



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Civil

“Impacto hidrológico en la microcuenca Quinahuaycu a partir de  
escenarios de cambio de cobertura vegetal”

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero Civil.

Autora: Janneth Carolina Jara León  
CI: 0106762792  
rtcarolina.jaral@gmail.com

Director: Ing. Diego Esteban Mora Serrano, PhD.  
CI: 0102423506

Cuenca – Ecuador  
19-abril-2021.

## RESUMEN

La importancia de los ecosistemas de páramo se relaciona primordialmente con el agua, su producción se debe al régimen meteorológico de la zona y su regulación al tipo de topografía, suelo y cobertura vegetal. Sin embargo, estos ecosistemas son muy sensibles a cualquier variación climática o ambiental. En el caso concreto de la microcuenca Quinahuaycu, localizada dentro de la zona de influencia del proyecto minero Quimsacocha, la principal forma de alteración es la expansión de vegetación herbácea debido al pastoreo.

Analizar el efecto de estas alteraciones antropogénicas en la hidrología de los páramos es relevante para optimizar la gestión del recurso hídrico. En la actualidad, una herramienta indispensable para realizar esta gestión es la modelación hidrológica, esta permite simular escenarios y probar hipótesis.

En el presente estudio se calibró el modelo hidrológico conceptual semidistribuido HBV-light en la microcuenca Quinahuaycu, optimizando una función objetivo para minimizar errores en el volumen promedio, se obtuvo una eficiencia promedio (Nash-Sutcliffe, Eff-Bias,  $\log(Q)$  y  $R^2$ ) de 0.793 en la calibración y 0.73 en la validación. Luego se cuantificó el impacto en la regulación hídrica simulando 3 escenarios de cambio de cobertura vegetal; recuperación de cobertura natural (RCN), aumento de vegetación herbácea debido a pastoreo (AVHp) y aumento de suelo desnudo (ASD). Para cumplir con los objetivos planteados, se estudiaron a detalle el estado actual de la morfometría, red hídrica y el uso de suelo y cobertura vegetal; se plantearon tasas de cambio en la vegetación para simular cada escenario y, por último, se comparó el estado actual con las simulaciones, analizando el rendimiento hídrico, el almacenamiento de agua en el suelo, la evapotranspiración actual, la curva de duración de caudal, el coeficiente de escorrentía y la variación de los caudales picos.

**Palabras clave:** Quinahuaycu. Páramo. Andes. Ecuador. Balance hidrológico. Modelación hidrológica. HBV-light. Escenario. Cobertura vegetal. Pajonales. Humedales. Pastoreo. Suelo desnudo.



## ABSTRACT

The importance of páramos ecosystems is mainly related to water. Its production is due to the weather patterns found in a specific zone and its regulation due to the topography, soil, and vegetation. Nonetheless, these ecosystems are susceptible to any sort of weather or environment changes. In the specific case of the Quinahuaycu catchment, located within the influence zone of the mining project Quimsacocha, the main alteration manner is grazing.

Analyzing the effect of these anthropogenic alterations on the páramos hydrology is relevant to enhance the water resource management. Currently, an essential tool to carry out this is the Hydrological Modelling management, this allows to scenarios and test hypotheses.

In the following quantitative research study, it was calibrated the conceptual semi-distributed HBV-light Hydrological Modelling in the Quinahuaycu catchment, with an 0.793 average efficiency (Nash-Sutcliffe, Eff-Bias,  $\log(Q)$  y  $R^2$ ) in calibration and 0.73 in validation. After, it was studied the impact in the water regulation, simulating 3 vegetation changes scenarios; recovery of Vegetation Cover (RCN), Increase of herbaceous vegetation due to grazing (AVHp), and Increase of bare soil (ASD). To achieve the stated goals, it was in-deep studied; the actual Morphometrics state, the water network, and the usage of oil and vegetation cover. There were posed rates of exchanges in vegetation to simulate each scenery. Lastly, it was compared the actual state with the simulations analyzing the water yields, the storage of water in soil, the current evapotranspiration, the flow duration curve, the run-off coefficient, and the flow-rate peak ranges.

**KEYWORDS:** Quinahuaycu. Páramo. Andes. Ecuador. Water balance. Hydrological modelling. HBV-light. Scenario. Land cover. Grasslands. Wetlands. Grazing. Bare soil.

## ÍNDICE GENERAL



<b>RESUMEN.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. Antecedentes .....</b>	<b>9</b>
1.1.1. Páramos ecuatorianos y su importancia .....	9
1.1.2. El mecanismo de la regulación hídrica del páramo.....	11
1.1.3. Principales afectaciones en los páramos.....	13
<b>1.2. El Balance Hidrológico .....</b>	<b>16</b>
1.2.1. Componentes del flujo de escorrentía .....	17
1.2.2. Ecuación del balance hídrico en la microcuenca Quinahuaycu .....	17
<b>1.3. Modelación Hidrológica .....</b>	<b>19</b>
1.3.1. Importancia .....	20
1.3.2. Componentes .....	20
1.3.3. Incertidumbre del modelo .....	22
<b>1.4. Problemática y Justificación .....</b>	<b>22</b>
1.4.1. Elección del modelo HBV-light para el caso de estudio .....	23
<b>1.5. Objetivos .....</b>	<b>25</b>
1.5.1. Objetivo General .....	25
1.5.2. Objetivos Específicos.....	25
<b>2. MATERIALES .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1. Zona de estudio .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2. Información GIS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3. Información hidrometeorológica .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4. Modelo HBV-light .....</b>	<b>29</b>
2.4.1. Componentes de la estructura Estándar versión Básica (EB).....	32
2.4.2. Eficiencia .....	35
2.4.3. Limitaciones .....	37
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. Cuenca Hidrográfica .....</b>	<b>39</b>
3.1.1. Características morfométricas .....	39
3.1.2. Red hídrica.....	41
3.1.3. Uso de suelo y cobertura vegetal .....	43
<b>3.2. Discretización de la microcuenca Quinahuaycu .....</b>	<b>43</b>
<b>3.3. Análisis de series temporales .....</b>	<b>46</b>
3.3.1. Datos disponibles .....	46
3.3.2. Selección de poblaciones de precipitación y caudal .....	46
3.3.3. Obtención de serie diaria de ETo .....	47



3.3.4.	Consistencia en registro de lluvias .....	49
3.3.5.	Estadística de datos.....	49
<b>3.4.</b>	<b>Análisis de Hidrogramas.....</b>	<b>50</b>
3.4.1.	Relación precipitación- escorrentía.....	50
3.4.2.	Componentes del hidrograma .....	51
3.4.3.	Separación de flujos .....	52
<b>3.5.</b>	<b>Modelación de Escenarios de Cambio de Vegetación .....</b>	<b>53</b>
3.5.1.	Calibración.....	54
3.5.2.	Validación .....	56
3.5.3.	Evaluación de Parámetros.....	56
3.5.4.	Simulación de escorrentía .....	58
3.5.5.	Escenario RCN .....	59
3.5.6.	Escenario AVH .....	63
3.5.7.	Escenario ASD.....	64
<b>4.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
4.1.	Eficiencia del modelo para balance de volumen .....	66
4.2.	Estado Actual.....	71
4.2.1.	Características físicas .....	71
4.2.2.	Características hidrometeorológicas.....	75
4.2.3.	Balance Hidrológico.....	81
4.3.	Prueba de hipótesis de cambio de vegetación.....	83
4.4.	Gestión social del agua.....	89
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>96</b>
7.1.	Mapas de Caracterización .....	96
7.2.	Curva Hipsométrica.....	102
7.2.1.	Tipos de Curvas .....	102
7.2.2.	Tabla de frecuencias altimétrica de la microcuenca Quinahuaycu .....	102
7.3.	Cauce principal .....	103
7.4.	Discretización de Quinahuaycu para el caso de estudio .....	104
7.5.	Resultados gráficos (HBV-light) caja de suelo, R1 y R2 de la Validación ....	105



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

**Janneth Carolina Jara León** en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **"Impacto hidrológico en la microcuenca Quinahuaycu a partir de escenarios de cambio de cobertura vegetal"**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 19 de abril de 2021.



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

**Janneth Carolina Jara León**, autora del trabajo de titulación “**Impacto hidrológico en la microcuenca Quinahuaycu a partir de escenarios de cambio de cobertura vegetal**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 19 de abril de 2021.

**Janneth Carolina Jara León**  
C.I: 0106762792



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por brindarme amor y apoyo incondicional en toda mi trayectoria como estudiante, a mis amigos por permearme de optimismo cuando lo he necesitado, a mi revisor Rigoberto por introducirme al mundo de la modelación hidrológica y a Antonio por acompañarme en todo el proceso de investigación y apoyarme como revisor externo.

A mi director Diego Mora y al personal del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), quienes han sido parte de mi proceso de aprendizaje en la fascinante hidrología de los ecosistemas andinos y a mis profesores que me han hecho sentir pasión por la carrera de ingeniería civil.



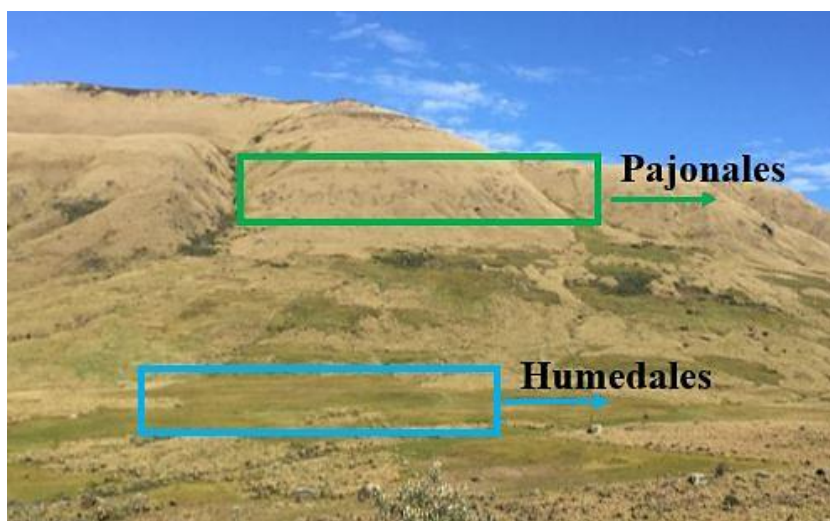
## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

#### 1.1.1. Páramos ecuatorianos y su importancia

El Ecuador es reconocido internacionalmente por sus ecosistemas andinos, los cuales son considerados endémicos por variables como el clima, suelo, relieve, entre otros. Los páramos son ecosistemas de alta montaña ubicados en la zona tropical del Ecuador que se sitúan a partir de los 2800 m s.n.m. en los Andes del Sur y a más de 3500 m s.n.m. en el Centro y Norte (Isch, 2012). En promedio se encuentran sobre los 3300 m s.n.m. (Chuncho & Chuncho, 2019) para identificar su ubicación, se delimita el área de páramo sobre los bosques altoandinos hasta el comienzo de las nieves perpetuas (Mena et al., 2011), algunos autores coinciden que estos ecosistemas representan aproximadamente el 7% del territorio nacional, puesto que, este porcentaje está basado en el área de páramo ecuatoriano “Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centrales” (Beltrán et al., 2009).

Existe una inmensa gama de microclimas que diversifica y distingue los ecosistemas parameros entre sí; Camacho, M. (2013) afirma que los factores que crean los microclimas son principalmente las condiciones meteorológicas y los suelos, de ello puede inferirse, que para poder hablar de características comunes y sus promedios, se describen únicamente los páramos de pajonales, estos representan el 70% de los páramos en territorio nacional según Hofstede et al., (2003).



*Ilustración 1: Cobertura vegetal natural. (Propio)*

La importancia de estos ecosistemas se ha relacionado esencialmente con el agua y su regulación, asimismo, existen varias razones que junto con la regulación hídrica han hecho del páramo un objeto de investigación científica. Ecuador depende a nivel nacional de forma económica y ambiental de los recursos naturales parameros, los cuales se describen a continuación:

- **Biodiversidad**

La flora y la fauna se han adaptado a las condiciones climáticas únicas de los páramos. Hofstede et al., estiman un 60% de endemismo en la flora del páramo (2003). La vegetación consiste principalmente en pajonales, rosetas, arbustos pequeños y musgos; Ecuador es el país andino con la flora más diversa del mundo, se han registrado alrededor de 1524 especies, además de 70 especies de mamíferos y 70 especies de aves (Chuncho & Chuncho, 2019).

- **Almacenamiento de carbono**

El páramo es esencial para mitigar el efecto invernadero, es el ecosistema más importante en Ecuador como sumidero de carbono, puesto que almacena hasta 6 veces más carbono que los bosques tropicales (Chuncho & Chuncho, 2019).

- **Prácticas productivas y extractivas**

El páramo constituye una zona importante para la producción de tubérculos, de los cuales el más relevante es la papa, también, se cultivan hortalizas, leguminosas, asimismo, se extraen plantas para elaborar medicamentos y muchas zonas son escenario de ganadería y extracción de minerales como el oro (Llambí et al., 2012).

- **Paisaje socio cultural**

El páramo es el hogar de comunidades indígenas y campesinas que mediante su interrelación han identificado su cosmovisión, costumbres y tradiciones (Camacho, 2014), asimismo, Ecuador es el país con la mayor cantidad de personas viviendo en los páramos (Ruiz, 2009), desarrollando de esta forma una rica herencia cultural (Llambí et al., 2012). Por último, se destaca su importancia arqueológica por la construcción de la ruta de comunicación de los Incas entre Quito y La Paz (Chuncho & Chuncho, 2019).

- **Atractivo turístico**

El ecosistema es visitado por millones de turistas al año (Llambí et al., 2012), constituyendo una importante fuente de ingresos económicos para las regiones andinas y en general para promocionar el turismo en Ecuador.

- **Agua**

El páramo es comúnmente conocido como “productor de agua”, en otros términos, una denominación más apropiada es “regulador de agua”, en vista de que regula naturalmente los caudales de los ríos durante las épocas de lluvia y sequía (Vásquez & Guzmán, 2011). El flujo o caudal base, es aquel que está presente en los ríos durante el estiaje y son los páramos los encargados de proveerlo a lo largo del año a las poblaciones de las zonas bajas (Chuncho & Chuncho, 2019).

El Ecuador tiene 31 sistemas hidrográficos que drenan hacia dos vertientes: la primera vertiente del pacífico con 24 cuencas y la segunda vertiente del amazonas con 7 (CEPAL, 2000), los principales sistemas fluviales de ambas vertientes nacen en el páramo (Hofstede et al., 2014) y se estima que estos sistemas son el 85% de las fuentes para abastecimiento de agua potable, riego y generación de energía hidroeléctrica (Ruiz, 2009). Las ciudades de Quito, Riobamba, Ambato y Cuenca dependen al 100% de las fuentes del páramo para abastecerse de agua potable (Hofstede et al., 2014).

El funcionamiento de las hidroeléctricas y el suministro de agua dependen de la capacidad de regulación hídrica de estos ecosistemas (Hofstede et al., 2014), el agua que el páramo aporta a los ríos y vertientes es alrededor de un litro por día por metro cuadrado en épocas de sequía (Ruiz, 2009), el 80% del consumo de agua en Ecuador se destina al riego, así la agricultura bajo riego representa el 75% del valor de la producción agrícola nacional, el 70% de la electricidad del país proviene de hidroeléctricas (CEPAL, 2000) y es importante señalar que, en épocas de estiaje, el caudal base de los páramos es el responsable de que estas puedan funcionar a lo largo del año, por ejemplo, en el caso del embalse AMALUZA en épocas de sequía el 100% del agua que llega al reservorio se origina en los páramos (Vásquez & Guzmán, 2011).

### **1.1.2. El mecanismo de la regulación hídrica del páramo**

El mecanismo de los páramos para regular el agua, es en realidad una frágil interacción entre varios factores:

- **Condiciones meteorológicas**

Las condiciones meteorológicas del páramo se caracteriza por una alta radiación UV, principalmente al medio día; baja presión atmosférica, frecuencia de niebla, alta humedad relativa (>90% ) durante todo el año (Chuncho & Chuncho, 2019) y una temperatura promedio de 10 °C, con un rango variable entre el día y la noche de hasta 24°C (Isch, 2012).

Las condiciones climáticas favorecen precipitaciones frecuentes y de baja intensidad, en efecto, la cantidad de lluvia varía entre 500 a 2000 mm/año en la mayoría

del territorio; tiene una estacionalidad bimodal, con épocas húmedas de febrero a mayo y de octubre a diciembre, estas condiciones y el poco consumo de agua, por parte de los pajonales, resulta una baja evapotranspiración (Chuncho & Chuncho, 2019) y benefician un exceso del recurso hídrico, de esta forma es como los suelos son alimentados así como las vertientes y ríos (Isch, 2012).

- **Suelo y cobertura vegetal**

En los ecosistemas altoandinos del norte hasta el sur de cuenca, los suelos se desarrollaron sobre cenizas volcánicas, este tipo de suelos son conocidos como “andosoles, andisoles o andasoles”, se caracterizan por tener un color negro debido a la concentración de materia orgánica (Mena et al., 2011), y a su vez, esta acumulación es consecuencia de la lenta descomposición del material vegetal, debido a las bajas temperaturas, por ende, su color se relaciona con la baja densidad aparente que poseen los andosoles, puesto que favorece la fijación de carbono y otros nutrientes en su estructura (Llambí et al., 2012).

La baja densidad aparente y la estructura abierta con alta porosidad del suelo paramero resultan en una elevada conductividad hidráulica (-15000 kPa), así como en una alta capacidad de retención de agua (Chuncho & Chuncho, 2019), misma, que puede superar en un 200% su propio peso (Camacho, 2014); Isch, E. (2012) señala una capacidad de almacenamiento de hasta 3 veces su propio peso, cabe destacar que, la cobertura natural del páramo es de vital importancia para que el suelo cumpla esa función de reservorio natural a causa de que cubre al suelo protegiéndolo de la alta radiación solar (Isch, 2012) evitando de esa forma la evaporación directa del agua almacenada, además, las raíces estabilizan su estructura evitando que el suelo se erosione (Llambí et al., 2012).

- **Topografía**

En escala de microcuenca, la topografía accidentada ha demostrado ser importante para el movimiento del agua en el suelo (Llambí et al., 2012), es decir, aumenta la conductividad hidráulica, *“El movimiento de agua en las cuencas altoandinas se caracteriza por la predominancia de flujo lateral subsuperficial (en el sentido de la pendiente) a través de la matriz del suelo”*(Crespo et al., 2014)., además, la geomorfología, influenciada por las glaciaciones incluye valles amplios en donde se han formado extensos humedales cuya función es ser reservorio natural del recurso hídrico (Hofstede et al., 2014).

- **El mecanismo de regulación**

Las condiciones climáticas, la interacción con el suelo, la cobertura vegetal y la topografía del páramo son los responsables de la regulación del ciclo hidrológico; *“El agua entra a los páramos a través de la precipitación vertical (lluvia o nieve) y la llamada precipitación horizontal (agua contenida en la neblina e interceptada por la vegetación)”* (Llambí et al., 2012).

Las precipitaciones frecuentes y de baja intensidad favorecen la infiltración del agua en el suelo convirtiéndolo en un gran reservorio; Crespo et al. (2014) señalan que la escorrentía por exceso de saturación solo se observa en las lluvias de larga duración ya que predomina el flujo lateral subsuperficial; en los tiempos de sequía, el agua que se encuentra almacenada en el suelo es liberada de forma lenta a los cuerpos receptores (Llambí et al., 2012), *“las propiedades de los suelos, topografía y la vegetación influyen en la regulación hidrológica cuando el agua se mueve dentro del suelo”* (Crespo et al., 2014), de esta manera los páramos proveen un caudal base sostenido a lo largo del año (Chuncho & Chuncho, 2019).

### 1.1.3. Principales afectaciones en los páramos

El estudio de las afectaciones antropogénicas en los páramos, se divide en impactos de dos grupos, el primero, debido al cambio de la cobertura vegetal y el segundo, debido al cambio climático. Por un lado, el cambio del uso del suelo se puede estudiar a través del cambio de cobertura vegetal, este problema se causa a nivel nacional y tiene efectos inmediatos en la regulación hídrica; por otro lado, el cambio climático es un proceso global que en Ecuador afecta principalmente a los ecosistemas altoandinos debido a su fragilidad ambiental, siendo sus repercusiones en la regulación hidrológica que se agravarán a largo plazo.

Actualmente, la principal causa de reducción de superficie de páramo es el cambio de uso del suelo antes que el cambio climático, adicionalmente, las actividades humanas generan un aumento en la presión demográfica, en la expansión e intensificación de las actividades como la agricultura, ganadería y minería en estos ecosistemas.

- **Cambio de cobertura vegetal**

El grado de afectación por las actividades que modifican el uso del suelo ha provocado que solo el 30% de la superficie original de los páramos de Ecuador mantengan sus condiciones naturales (Isch, 2012).

Los problemas comunes en los páramos ecuatorianos especialmente en los del norte, son los sistemas agrícolas, la quema y el pastoreo; estos, son la causa del aumento en la escorrentía superficial y reducción de la conductividad hidráulica, ya que se forman agregados hidrofóbicos en el suelo (Chuncho & Chuncho, 2019).

Un ejemplo común, de un sistema agrícola que amenaza estos ecosistemas, es la plantación de pinos, puesto que, en el año de 1990 el 36% de las plantaciones forestales en Ecuador eran pinos encontrándose la mayoría en los páramos, por esta razón, las plantaciones de coníferas exóticas tuvieron una alta demanda a nivel mundial por su rápido

crecimiento (Chuncho & Chuncho, 2019), sin embargo, disminuyen la “producción” de agua en los páramos por su alto consumo hídrico (Crespo et al., 2014) .

De igual modo, la minería es otra amenaza a nivel nacional en los páramos, puesto que se han descubierto millones de onzas de oro, condición que ha llevado a Ecuador a un proceso de consolidación como país minero. Se presume que el 28% del páramo puede ser afectado por la minería, tomando en cuenta los proyectos mineros en proceso y de las concesiones (Chuncho & Chuncho, 2019), en la parte centro sur de la región interandina, se destaca el proyecto minero concesionado a la empresa canadiense IAMGOLD, denominado “Quimsacocha”, que busca explotar un yacimiento de oro a nivel subterráneo en el páramo de la provincia de Azuay, Ecuador.

Crespo, et al. (2014) desde el año 2000 hasta el 2008 realizaron una complicación de los estudios realizados por la Universidad de Cuenca, relativo a los ecosistemas de páramo, en ellos se expusieron que la alteración del ecosistema se debe principalmente al pastoreo, cultivos, forestación, construcciones, obras viales y la minería; los resultados se obtuvieron comparando cuencas pareadas alteradas con cuencas pareadas naturales, obteniendo como resultado las siguientes conclusiones:

- El pastoreo extensivo, si bien, disminuye la cantidad de agua que sale de la cuenca, parece no afectar la respuesta hidrológica de las mismas debido a la baja carga animal, técnicas de rotación de ganado anual y a que las quemas no han causado daños significativos en el suelo.
- El impacto de los cultivos es la pérdida de regulación hídrica de las cuencas con un alto incremento en los caudales pico, reducción de los caudales base y medio y disminución del rendimiento hídrico por el incremento en la evapotranspiración. La afectación es directamente a la regulación hídrica y en menor grado a la cantidad de agua que sale por la cuenca. Por último, se evidencia una alta producción de sedimentos.
- La forestación con pino redujo en un 42% la producción de agua de la cuenca, esto se debe al aumento de la evapotranspiración y la intercepción del dosel. Hubo una drástica reducción en los caudales bajos y medios. Finalmente se concluyó que las plantaciones de pino no tienen ningún efecto en el control de caudales extremos.

- **Cambio climático**

El cambio climático afecta a los ecosistemas altoandinos más que a las tierras bajas; los páramos son especialmente vulnerables debido a la fragilidad de sus interacciones ambientales (Isch, 2012). Este fenómeno en los páramos se manifiesta a través del aumento en la temperatura media anual y la alteración en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones (Isch, 2012), afectando la capacidad de regulación hídrica, así como la capacidad de retención del carbono del suelo (Chuncho & Chuncho, 2019).

Una clara evidencia del calentamiento global en los Andes es la reducción de los glaciares, los cuales retienen agua, aunque en menor cantidad que los páramos. La prueba de la aceleración de este fenómeno, se puede observar en el retroceso del 40% de los glaciares del Cotopaxi durante los últimos 30 años (Isch, 2012).

La temperatura media aumentó alrededor de  $0.7^{\circ}\text{C}$  entre 1939 y 2006 en los Andes tropicales (Andrade & Ríos, 2014), asimismo, con el aumento de la temperatura, se reduce el territorio del páramo ocasionando que se desplacen hacia zonas más elevadas ya que el suelo necesita de temperaturas bajas para conservar sus características edafológicas. Las temperaturas altas modifican el suelo provocando una mayor escorrentía en periodos de lluvia y una reducción del flujo en el estiaje (Isch, 2012); también, provoca aumento en la evapotranspiración lo que ocasiona un descenso en el caudal base (Villue M., 2013).

Los cambios en la estacionalidad y en la cantidad de precipitación aumentan la sequía del suelo, reduciendo la capacidad de retención del agua (Villue M., 2013). Andrade & Ríos (2014) demostraron que los caudales mínimos en los Andes tropicales no solo dependen de las aguas subterráneas o la retención y aportaciones de lagos o humedales, también, la ocurrencia y distribución de las lluvias estacionales en el periodo de estiaje, que incide directamente en la presencia y variabilidad de los caudales mínimos.

Los efectos que se presentan actualmente son el resultado del incremento de la temperatura en los últimos 150 años, que es menos de  $1^{\circ}\text{C}$ .; aunque se deje de emitir Gases de Efecto Invernadero (GEI), las previsiones futuras pronostican la aceleración del calentamiento global que plantea la probabilidad de un aumento de  $2^{\circ}\text{C}$  para el año 2050 el incremento continuará porque los efectos del clima no son inmediatos (Isch, 2012). Con un aumento de  $2^{\circ}\text{C}$ , se pronostica en Ecuador una reducción del 20% en la precipitación y la reducción en la escorrentía anual de 7 de sus 11 principales cuencas (Amat y León, 2008).



## 1.2. El Balance Hidrológico

El balance hídrico es el resultado de aplicar el principio de continuidad o conservación de la masa al agua que transita en un sistema (Llambí et al., 2012), es decir, se estudia el ciclo hidrológico o el movimiento del agua en sus diferentes estados en una cuenca, este movimiento puede ser muy complejo, por lo que, para el caso de estudio, se adapta “la ecuación del balance hidrológico” a los principales procesos que intervienen en el ciclo del agua en una microcuenca de páramo de pajonal.

*“La ecuación del balance hidrológico es una herramienta útil para obtener estimaciones de la magnitud y distribución en el tiempo de las variables hidrológicas”* (Campos, 1998).

La ecuación del balance hidrológico permite conocer el volumen anual de escurrimiento y el periodo en el que se produce excedentes, por lo tanto, la infiltración o recarga del acuífero, también, el periodo en el que se produce un déficit de agua o sequía (Ochoa, 2015a).

Aplicando la primera ley de la termodinámica (Ven Te Chow et al., 1994), fue como llegaron a la ecuación general de transferencia de energía hacia el fluido::

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dH}{dt} - \frac{dW}{dt}$$

*Dónde:*

$\frac{dE}{dt}$ : *tasa neta de transferencia de energía hacia el fluido*

$\frac{dH}{dt}$ : *tasa a la cual el calor se transfiere al fluido*

$\frac{dW}{dt}$ : *tasa a la cual el fluido hace trabajo sobre sus alrededores*

La ecuación aplicada al análisis hidrológico se muestra a continuación (Campos, 1998):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I(t) - O(t)$$

*Dónde:*

$\frac{\Delta S}{\Delta t}$ : *Variación o cambio en el tiempo del almacenamiento de agua; volumen de agua en movimiento por la interacción de las entradas y salidas. Tiende a cero cuando el tiempo estudiado es mayor a un año.*

*I: input o flujos de agua de entrada.*

*O: output o flujos de agua de salida.*



### 1.2.1. Componentes del flujo de escorrentía

Clasificación de Aparicio (1992) en la siguiente forma:

**A) Escurrimiento superficial o directo ( $Q_s$ ):** Se compone del flujo sobre el terreno ya que proviene de la precipitación en exceso o precipitación neta ligado a las tormentas.

**B) Escurrimiento sub superficial:** Corresponde a una parte del agua de la infiltración que circula cerca y de forma paralela a la superficie del suelo; dependiendo de la permeabilidad y la conductividad hidráulica de los suelos, se puede tratar como parte del caudal directo o del caudal base.

**C) Escurrimiento subterráneo, caudal o flujo base (FB):** Es el agua que se infiltra a niveles inferiores al freático y alimenta los cauces cuando no hay lluvias.

El análisis de los hidrogramas tiene como objetivo separar estos componentes del flujo, encontrando la recesión de la escorrentía directa. En el apartado 3.4 de [Análisis de Hidrogramas](#) del presente trabajo de investigación, se detalla cómo se realiza el proceso mediante el modelo HBV-light.

### 1.2.2. Ecuación del balance hídrico en la microcuenca Quinahuaycu

En suma, a partir de la ecuación general de balance hídrico y aplicando la metodología (Campos (1998), se puede obtener una ecuación que represente una microcuenca de pajonal.

- Variación del almacenamiento de agua en el subsistema superficial

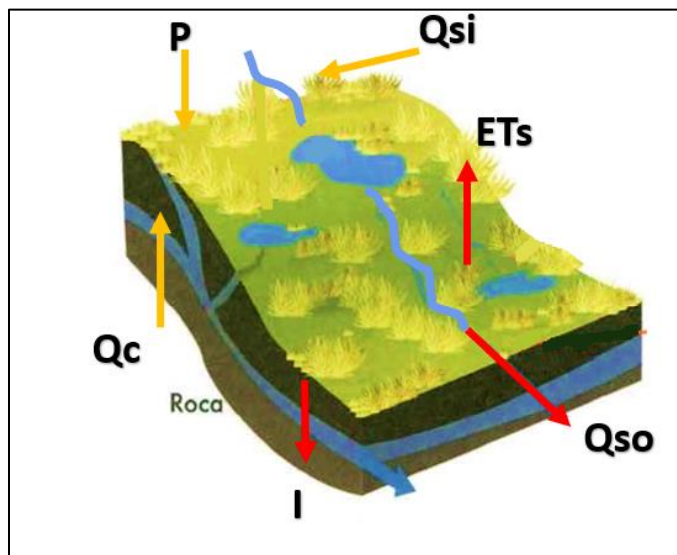


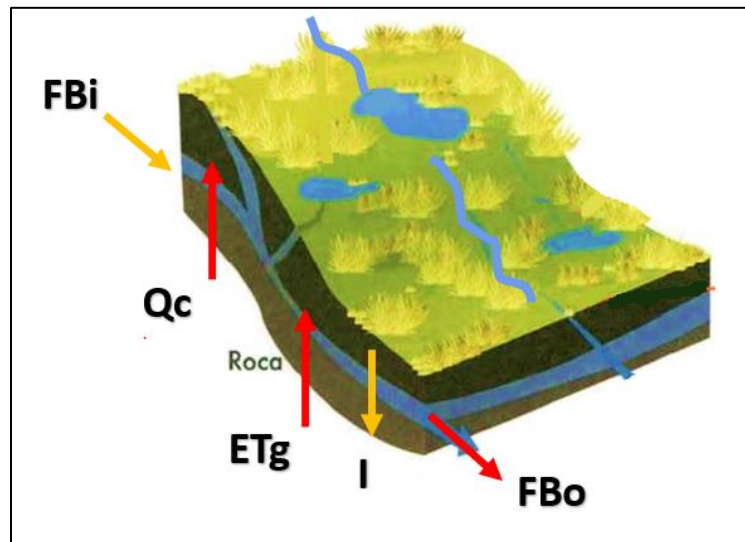
Ilustración 2: Balance hídrico en el subsistema superficial de páramo. Imagen base (Llambí et al., 2012).

Los flujos de entrada son: la precipitación, el caudal de entrada y un caudal subterráneo que asciende por capilaridad. Los flujos de salida son: el caudal de salida, la evaporación (de los cuerpos de agua, del suelo y de la humedad interceptada por la vegetación), la transpiración de la vegetación y la infiltración; cabe mencionar que, la suma de la evaporación y transpiración se conoce como evapotranspiración.

La ecuación del balance hídrico es:

$$P + Q_{si} + Q_c - Q_{so} - ET_s - I = \Delta S_s$$

- **Variación del almacenamiento de agua en el subsistema subterráneo**



*Ilustración 3: Balance Hídrico en subsistema subterráneo de paramo. Imagen base (Llambí et al., 2012).*

Los flujos de entrada son: la infiltración, el caudal base o flujo base de entrada (movimiento del agua percolada); los flujos de salida son: el caudal base de salida, el caudal subterráneo que asciende por capilaridad y la evapotranspiración.

La ecuación del balance hídrico es:

$$I + F_{Bi} - F_{Bo} - Q_c - ET_g = \Delta S_g$$

- **Ecuación del balance hidrológico del sistema**

La ecuación del balance hidrológico de todo el sistema se obtiene sumando las últimas dos ecuaciones:

$$P - (Q_{so} - Q_{si}) - (F_{Bo} - F_{Bi}) - (ET_s + ET_g) = \Delta(S_s + S_g)$$

De conformidad con lo anteriormente expuesto, es dable a formularse la siguiente pregunta: ¿Qué cantidad de escorrentía superficial, flujo base y almacenamiento de agua presenta el sistema?; esta pregunta se puede responder con la ecuación (A):

$$P - Q_s - FB - ET = \Delta S(t) \quad (A)$$

*Dónde:*

*i:* Subíndice de flujo de entrada

*o:* Subíndice de flujo de salida

*s:* Subíndice de flujos superficiales (Surface)

*g:* Subíndice de flujos subterráneos (Groundwater)

*c:* Subíndice de flujo por capilaridad

*P:* Precipitación

*Q:* Caudal o escorrentía

*FB:* Flujo Base

*ET:* Evapotranspiración

*I:* Infiltración

*S:* Almacenamiento

$\Delta$ : Variación

Para poder aplicar la ecuación es importante que el agua que se estudia pertenezca a la misma unidad hidrológica o volumen de control, asimismo, que el periodo de tiempo sea el mismo para todas las variables estudiadas con un paso de tiempo adecuado para representar el sistema (Ochoa, 2015a).

### 1.3. Modelación Hidrológica

Un modelo es una representación simplificada de un sistema del mundo real, si los resultados del modelo son cercanos a la información observada en el sistema real, se puede inferir que, éste brinda precisión (similitud entre valores simulados) y exactitud (cercanía entre valores simulados y observados) para estimar variables de interés (Devia et al., 2015; Cabrera, 2012).

### 1.3.1. Importancia

Los registros de información medidos en campo sirven de apoyo a los ingenieros como datos de partida para el diseño de proyectos hidráulicos, no obstante, es común que se cuente con poca o nula información hidrometeorológica, en estos casos la simulación es una herramienta para obtener resultados confiables para tomar decisiones sobre el aprovechamiento y manejo del recurso hídrico (Viessman et al., 1989).

En caso concreto, los fenómenos de interés se estudian con modelos hidrológicos que se relacionan con las variables del ciclo del agua, entre los principales fenómenos se encuentran, los efectos del cambio de uso de suelo y los efectos del cambio climático en la escorrentía; eventos extremos (inundaciones, caudales y lluvias con un periodo de retorno) para control de inundaciones, drenajes y aliviaderos; disponibilidad de agua para abastecimiento; calidad de agua (transporte de sedimentos y contaminantes); etc. (Mendoza, 2020; Viessman et al., 1989).

### 1.3.2. Componentes

La considerable variabilidad de la hidro-meteorología dificulta tener modelos hidrológicos específicos, tan es así que, Mendoza (2020) explica esta problemática con la existencia de distintas filosofías en modelación; algunos modelos se basan en la observación de campo como herramienta (modelos basados en índices y conceptuales) con su respectiva etapa de calibración; otros modelos parten de la premisa de que todas las leyes físicas de termodinámica son conocidas aumentando la complejidad del modelo y el gasto computacional (modelos físicos).

Para especificar el alcance del trabajo de titulación, se enuncian los conceptos que son aplicables para modelos hidrológicos lluvia-escorrentía, conceptuales y distribuidos o semi distribuidos, considerado para la presente investigación.

En la anualidad 2020, Pablo Mendoza PhD Catedrático de la Universidad de Chile, mediante clase virtual, clasificó los componentes de un modelo hidrológico en el siguiente sentido:

- **Modelo Perceptual**

El modelo perceptual es de carácter cualitativo, en virtud de que se basa en la comprensión humana del funcionamiento del ciclo hidrológico; a partir de los datos medidos en el terreno, se establecen los procesos dominantes de la cuenca para definir en donde están los almacenamientos de agua y hacia donde fluyen, por ello, se deduce el concepto clave de “singularidad del lugar” (uniqueness of place) debido a que cada cuenca tienen sus propias características hidrometeorológicas, de vegetación, topografía, etc., las cuales justifican la respuesta hidrológica.

- **Modelo Matemático**

El modelo matemático, representa a través de ecuaciones matemáticas el comportamiento hidrológico de la cuenca, calcula un modelo matemático para la variación espacial (vertical, horizontal) y otro para la estructura de ecuaciones del sistema; lo más común, en los modelos en general, es que se basen en el balance hídrico. A continuación, derivado del resultado del proceso matemático se explica y describe el caso de estudio relativo a las variables de estado, flujo, parámetros y parametrizaciones.

*Tabla 1: Modelo matemático*

Tipo	Descripción	Caso de estudio
<b>Variables de estado</b>	Reservorios; ejemplos generales son: Almacenamiento en acuíferos, agua de la nieve, contenido de humedad del suelo, cantidad de agua interceptada en vegetación.	Suelo del páramo y su vegetación.
<b>Variables de flujo</b>	Todos los tipos de flujo o el movimiento del agua en el sistema (input y output).	Precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial y flujo base.
<b>Parametrizaciones:</b>	Ecuaciones características para determinar un flujo, que luego se necesita como dato de entrada en el modelo. Se plantean a partir de las variables de flujo y estado.	Parametrizaciones del modelo HBV-light.
<b>Parámetros:</b>	Coefficientes que aparecen en las ecuaciones, algunos son medibles u observables como la conductividad hidráulica del suelo.	El modelo HBV-light se basa en parámetros libres, es decir, coeficientes que pueden ser iterados hasta ajustar el modelo.

Los sistemas de ecuaciones están incompletos por términos que se desconocen, como las pérdidas por interceptación, evapotranspiración de la superficie del suelo, etc. La forma en la que el modelo computacional resuelve el modelo matemático es realizando mecanismos de iteraciones para encontrar números en las ecuaciones que representen la cuenca o el modelo perceptual. Por último, es importante resaltar que toda medición de parámetros observable u libres están asociados a incertidumbre, ya que las mediciones no son exactas.

- **Modelo Computacional**

El modelo computacional son algoritmos que realizan las operaciones para generar soluciones de las ecuaciones del modelo matemático, de manera que, es importante el método de solución numérica del modelo; ciertamente, en el caso de modelos de hidrología,

es importante que se asegure soluciones estables al estar resolviendo las ecuaciones de conservación de energía conocido como el balance hídrico.

### **1.3.3. Incertidumbre del modelo**

Existen errores aleatorios y sistemáticos, por una parte, son fluctuaciones aleatorias no controlables, por otra parte, son errores que se repiten de manera permanente con aproximación en la misma magnitud, por ende, esto hace que todas las mediciones se encuentren desviadas en un mismo valor de la medida real, de ahí que, si se determina el valor sistemático se puede corregir la medida (Cabrera, 2012).

En ese contexto, (Cabrera, 2012) agrupa en 4 categorías las fuentes de incertidumbre, en primer lugar, los errores en los datos de ingreso, se asocian no solo a datos de campo, sino a cualquier método que se utilice para obtener series de datos de ingreso, por ejemplo, el método de polígonos de Thiessen para la precipitación media de una cuenca, en segundo lugar, los errores en los datos observados, debido a la medición de los datos hidrometeorológicos, ya que ninguna medición es exacta, en tercer lugar, los errores debido a valores no óptimos de parámetros, cuando se asumen valores que no son el resultado de un proceso de optimización, y, en cuarto lugar, los errores debido a la estructura del modelo, que son propios del modelo y no pueden ser minimizados a menos que se cambie la estructura del modelo o el código fuente; cabe mencionar que, la calibración solo puede minimizar los primeros tres grupos de errores.

En el capítulo de metodología ([3.5](#) Modelación de escenarios de cambio de vegetación) se detalla el proceso de calibración, validación y simulación de escorrentía, en la microcuenca Quinahuaycu con el modelo hidrológico HBV-light; asimismo, en el capítulo Materiales ([2.4.2](#) Eficiencia del modelo HBV-light) se detallan los índices de eficiencia del modelo HBV-light, mismos que son usados para evaluar los parámetros en el proceso de calibración en Quinahuaycu.

## **1.4. Problemática y Justificación**

Teniendo en cuenta la importancia de los ecosistemas de páramo y su fragilidad ante cualquier alteración climática-ambiental, al estudiar los impactos que estas ocasionan en su mecanismo de regulación hidrológica, de manera que, es esencial tomar decisiones responsables respecto a la conservación, manejo y control de actividades antropogénicas en los páramos; por lo tanto, el monitoreo, investigación y manejo sustentable de los páramos, tienen como meta gestionar y asegurar el aprovechamiento del recurso hídrico a largo plazo.

En la actualidad, la principal forma de alteración en la microcuenca Quinahuaycu, es la expansión de vegetación herbácea debido al pastoreo, la cual, constituye un 21% de la cobertura vegetal total, además, la zona de estudio se encuentra dentro de la zona de influencia del proyecto minero Río Blanco; por estos motivos, se propone estudiar el impacto hidrológico debido al incremento de vegetación herbácea debido al pastoreo y el impacto de la minería a través del análisis del retiro de la cobertura vegetal.

Cabe mencionar que, en el presente estudio no se consideraron los efectos del cambio climático, ya que para el desarrollo ese tema se requiere de una investigación extensa y específica, separado del objetivo del presente trabajo de titulación.

En ese contexto, para poder estudiar los posibles impactos (tendencias o cambios) en variables aleatorias hidrológicas, se hace uso de la hidrología estadística, la cual ofrece herramientas para estimar parámetros que dependen de fenómenos probabilísticos, como es el caso de la hidro meteorología de los ecosistemas andinos de pajonales.

Asimismo, la metodología empleada necesita un determinado registro de datos; Crespo et al., (2014) afirman que en las cuencas andinas el monitoreo con propósitos de investigación, se ha limitado a becas doctorales o al financiamiento de pequeños proyectos, sin embargo, cuando finaliza el posgrado o proyecto conferido, finaliza la recolección de datos, de manera que, pocas cuencas andinas han sido estudiadas a detalle.

Por consiguiente, la modelación hidrológica surge como una herramienta para solucionar la problemática mencionada; programas establecidos en *softwares* permiten identificar errores en los registros existentes, extender las series de datos y controlar su calidad. Como resultado, el modelo hidrológico HBV-light, se usa para realizar estudios de balance hídrico, pronosticar caudales para el control de inundaciones y operación de embalses, calcular avenidas de diseño y para estudiar el efecto de los cambios dentro de la cuenca y del cambio climático (Seibert, 2011).

#### **1.4.1. Elección del modelo HBV-light para el caso de estudio**

Existen modelos para simular escorrentía, entre los más usados se encuentran: VIC, TOPMODEL, SWAT, HBV, y MIKESHE; cada modelo tiene sus propias características y rangos de aplicaciones en vista de que fueron desarrollados para un determinado sistema y necesidades, por consiguiente es importante escoger un modelo que se adapte a las características del sistema que se propone estudiar (Devia et al., 2015).

En caso en concreto, el modelo HBV-light fue elegido para el estudio por lo siguiente:

- Fue desarrollado para los sistemas montañosos de la cordillera de los Alpes (Suiza), los cuales tienen semejanza con los ecosistemas en la cordillera de los Andes.
- Ha sido usado con resultados satisfactorios tanto en los ecosistemas de los Alpes de Suiza, como en otros sistemas montañosos en países extranjeros (Seibert, 2011).
- Se ha calibrado para ecosistemas de páramo de pajonal en la Cuenca del río Paute (Cordillera de los Andes, sur de Ecuador), concretamente en el Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay, ubicado en el centro de la provincia de Azuay, sobre los cantones Girón y San Fernando. Esta zona tiene un área de 7.53 km<sup>2</sup>, una altitud que varía desde 3495 hasta 3900 msnm y precipitación media anual de 1345 mm. En consecuencia, se publicaron: la tesis (pregrado) *“Evaluación del desempeño del modelo hidrológico HBV-Light en una microcuenca de páramo”* (Montalván, 2017) y el artículo *“Impact of Rain Gauges Distribution on the Runoff Simulation of a Small Mountain Catchment in Southern Ecuador”* (Sucuzhañay & Célleri, 2018). Estos documentos se tomaron como punto de partida para la elección de la estructura, versión y parámetros iniciales del modelo, para su calibración, en la Microcuenca Quinahuaycu.
- **Elección del modelo estándar, versión básica**

En Montalván (2017), se estudiaron 8 estructuras del modelo, de forma agregada (S8) y distribuida (S1-S7), usando para la auto calibración los criterios: Nash – Sutcliffe, Logaritmos de Nash-Sutcliffe (Nash – ln) y Sesgo Relativo (Bias); los resultados del estudio se describieron como positivos favorables y adaptables para la aplicación del modelo estándar en un ecosistema de páramo dentro del observatorio Ecohidrológico Zhurucay. Por consiguiente, se obtuvo la mayor eficiencia con el modelo semidistribuido y para cada optimización el mayor rendimiento se obtuvo lo siguiente:

- Optimización para Nash – Sutcliffe: Modelo Estándar, Versión Básica
- Optimización para Nash – ln: Modelo Estándar, Versión Básica
- Optimización para Bias: Modelo Estándar, Versión UZL, K0 en la capa SUZ.

El artículo publicado por (Sucuzhañay & Célleri, 2018) estudia el impacto de la estimación de la lluvia media aérea (según diferentes distribuciones de pluviómetros usados para el cómputo) en la simulación del caudal. Por consiguiente, a partir de una red de 12 pluviómetros, se plantearon 6 escenarios de lluvia y se obtuvo hasta un 25% de diferencia entre los caudales simulados, de ahí se concluyó que todas las estructuras del



modelo representan de buena forma la esorrentía promedio, aun cuando, el modelo estándar supera a las demás simulando las componentes del flujo.

Por último, no es necesario representar el suelo de pajonal con más de una caja de suelo ya que no es tan profundo (80-100 cm), la capa subterránea es basamento de roca impermeable, por lo tanto, no existe percolación profunda, predominando el flujo sub superficial.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

Analizar el impacto en la hidrología de la microcuenca de páramo Quinahuyacu, a partir de escenarios de cambio de cobertura vegetal, por medio del modelo hidrológico conceptual semi-distribuido HBV-light.

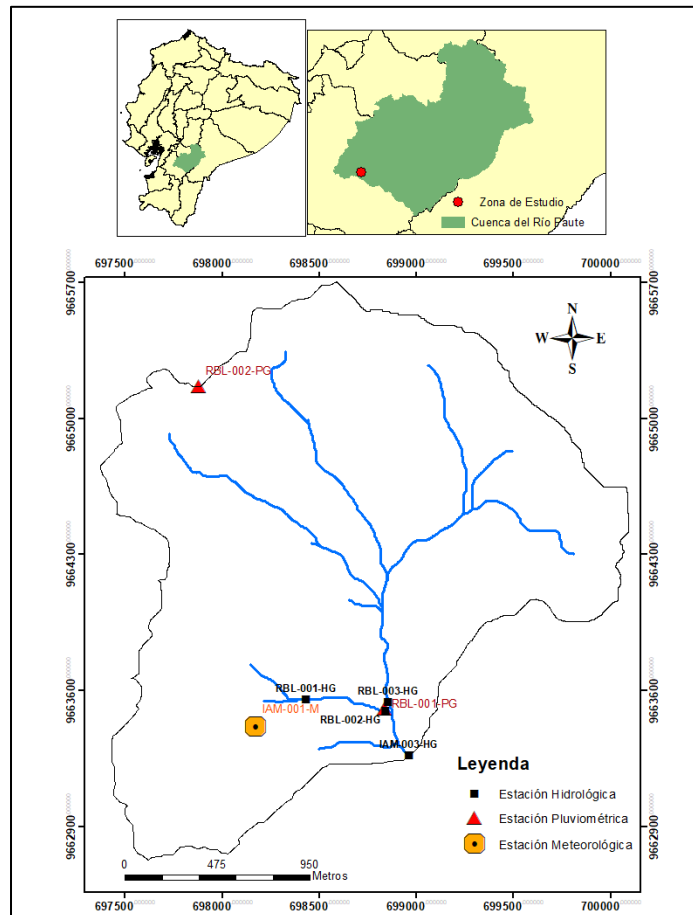
### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el estado actual de la hidrografía de la microcuenca Quinahuyacu.
- Estudiar las series temporales hidrometeorológicas disponibles de la microcuenca Quinahuyacu.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico HBV-light para la microcuenca Quinahuyacu.
- Analizar el efecto del cambio de cobertura vegetal en la hidrología de Quinahuyacu.

## 2. MATERIALES

### 2.1. Zona de estudio

El área de Quinahuaycu corresponde a una microcuenca ubicada al sureste de la Cuenca hidrográfica del río Paute en la subcuenca del río Tarqui; a su vez, esta superficie pertenece al área nacional de recreación Quimsacocha, cuya geología y geomorfología fue moldeada por la actividad de un volcán del mismo nombre, durante el pleistoceno y el holoceno. Las rocas de la formación Tarqui presentan una baja permeabilidad y buenas propiedades geomecánicas, de manera que, se destaca la estabilidad de taludes ya que el material tobáceo de la zona permite a las rocas soportar taludes sub verticales al actuar como un aglutinante (ETAPA & GAD Cuenca, 2018).



*Ilustración 4: Red Hidro-meteorológica de Quinahuaycu*

En la microcuenca Quinahuaycu nacen los afluentes del río Irquis, en tal caso, la unión de este río con los ríos Portete, San Agustín, Cumba y Zhucay originan el río Tarqui, que atraviesa el sur de la ciudad y es uno de los 4 principales ríos de Cuenca.

En la actualidad, existe una captación lateral con tubería que conduce el agua del río Irquis hacia la planta de tratamiento de agua potable IRQUIS, esta planta abastece a los centros cantonales de las parroquias de Tarqui y Victoria del Portete con una capacidad de 35 l/s y es administrada por la empresa ETAPA-EP (ETAPA EP, 2021).

## 2.2. Información GIS

El área de geomática del Programa para el manejo del agua y del suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, facilitó la información geográfica de la microcuenca Quinahuaycu, delimitando su área con un punto de descarga en la estación hidrológica IAM-003-HG. El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en formato ráster tiene un tamaño de píxel de 3\*3m., también, fue proporcionado, en formato shape, asimismo, la cuenca fue delimitada estableciendo las ubicaciones de las estaciones hidrometereológicas y la cobertura vegetal. La información de cobertura vegetal se obtuvo a partir de ortofotos con escala 1:25000, pertenecientes al Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS).

## 2.3. Información hidrometeorológica

La información de la red hidrometereológica de la microcuenca Quinahuaycu fue proporcionada por el departamento de recursos hídricos de PROMAS. Esta red consta de 2 pluviómetros, 4 vertederos y una estación meteorológica. Además, para el relleno de datos de lluvia, se utilizó 3 pluviómetros de dos microcuencas próximas. En la Tabla 2 se muestra el periodo de monitoreo y las variables medidas en cada estación.

Tabla 2: Estaciones de aforo

Descripción	Código	Periodo Observado	Variables Medidas
Estación Hidrológica	RBL-001-HG	2017-2020	Caudal horario, Caudal diario
Estación Hidrológica	RBL-002-HG	2017-2020	Caudal horario, Caudal diario
Estación Hidrológica	RBL-003-HG	2017-2020	Caudal horario, Caudal diario
Estación Hidrológica	IAM-003-HG	2017-2020	Caudal horario, Caudal diario
Estación Pluviométrica	RBL-001-PG	2017-2019	Precipitación horaria, diaria
Estación Pluviométrica	RBL-002-PG	2019-2020	Precipitación horaria, diaria
Estación Pluviométrica	IAM-003-PG	2017-2020	Precipitación horaria, diaria
Estación Pluviométrica	IAM-004-PG	2017-2020	Precipitación horaria, diaria
Estación Pluviométrica	VLR-004-PG	2017-2020	Precipitación horaria, diaria
Estación Meteorológica	IAM-001-M	2018-2019	Temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento



*Ilustración 5: Vertederos de Quinahuaycu (Fotos base: Ing. Oscar Morales PROMAS)*



*Ilustración 6: Pluviómetros de Quinahuaycu (Fotos base: Ing Oscar Morales PROMAS)*



*Ilustración 7: Estación meteorológica de Quinahuyacu*

## **2.4. Modelo HBV-light**

El modelo “Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning”, HBV, fue desarrollado por Sten Bergström y su equipo de trabajo en 1976 en el Instituto Sueco de Hidrología y Meteorología, SMHI; Jan Seibert desarrolló la versión HBV-light, incluyendo las siguientes actualizaciones: la posibilidad de discretizar la cuenca en subcuencas para mejorar los resultados del modelo y una interfaz amigable (Seibert, 2005; University of Zurich website, 2020).

El Modelo HBV-light es un modelo conceptual, continuo y semi distribuido (aunque puede ser usado como modelo puntual) para simulación de escorrentía a partir de datos (diarios) de entrada de precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia (Seibert, 2005).

A continuación, se resume el funcionamiento del modelo estándar básico, sus características, parámetros y rutinas, en base al manual del modelo (Seibert, 2005) y lo expuesto en: (Seibert, 2011), (Vidmar, 2016), (Ivkovic, 2014), (Montalván, 2017) y (Sucuzhañay & Céleri, 2018).

La parte perceptual (sistemas montañosos) y matemática del modelo, se relacionan mediante el concepto del reservorio lineal, el cual, describe una cuenca donde la escorrentía en el tiempo  $Q(t)$ , es proporcional al agua almacenada  $S(t)$ .



La Ilustración 8 muestra la estructura elegida del modelo para el caso de estudio:

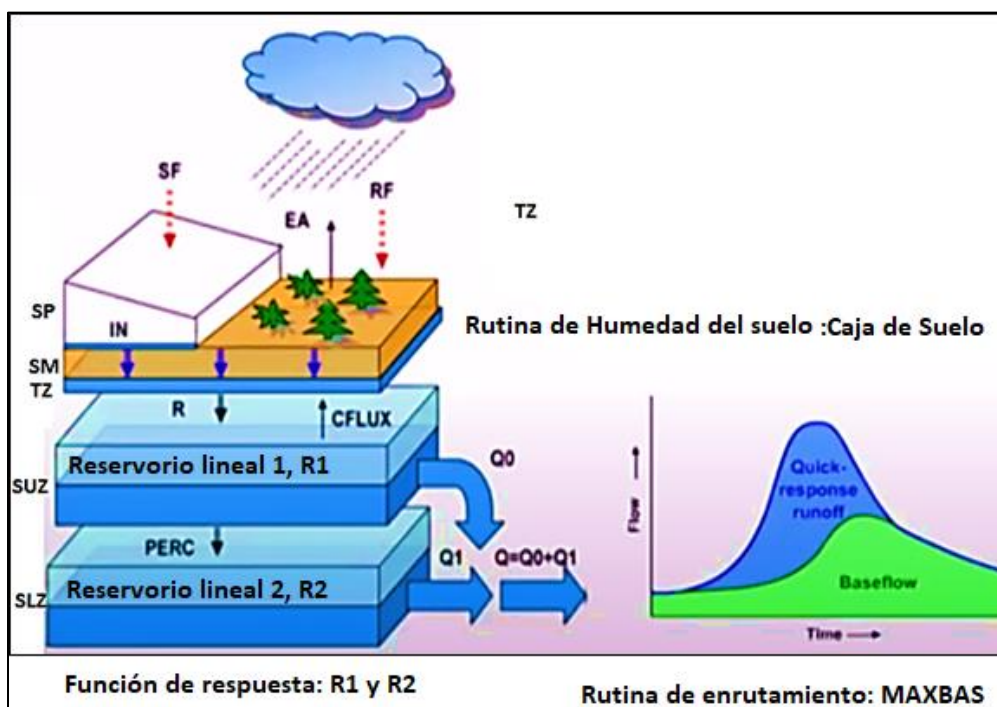


Ilustración 8: Estructura estándar, versión básica. Ilustración base: (Ivkovic, 2014)

La ecuación del balance hídrico del modelo se representa en la ecuación (B).

$$P - ET - Q = \frac{d}{dt} (SP + SM + TZ + SUZ + SLZ + lakes) \quad (B)$$

Dónde:

*P*: Precipitación

*ET*: Evapotranspiración real o *ETc* (Evapotranspiración del cultivo)

*Q*: Escorrentía total o caudal (*Qs*+*FB*)

*SP*: Paquete de nieve (Snow Pack).

*SM*: Humedad del suelo (Soil Moisture).

*TZ*: Intercepción de agua (Cobertura Vegetal) o almacenamiento en el límite superior del suelo introducido en HBV-light, (Top Zone)

*SUZ*: Almacenamiento de agua subterránea en la caja superior (Soil Upper Zone)

*SLZ*: Almacenamiento de agua subterránea en la parte baja (Soil Lower Zone)

*Lakes*: volumen de lagos

Cabe mencionar que, por causa de que los ecosistemas de pajonales en el sur de la cordillera de los Andes del Ecuador no tienen nevados, la rutina de nieve del modelo y la información requerida para esta (temperatura), no son factores necesarios para la calibración del modelo.

Asimismo, por tratarse de una zona de nacientes hídricos con topografía escarpada la zona de estudio también carece de lagos, por consiguiente, los términos “SP” y “lakes” se desprecian, resultando la ecuación (C) para el balance hídrico del modelo aplicado a la microcuenca Quinahuaycu de la siguiente manera:

$$P - Q - ET = \frac{d}{dt}(SM + TZ + SUZ + SLZ) \quad (C)$$

La ecuación (C) expresa que, la diversificación de las 3 variables de flujo: precipitación, caudal total (directo y flujo base) y evapotranspiración actual o real; es igual a la variación de 4 variables de estado: humedad del suelo, almacenamiento por cobertura vegetal, almacenamiento en la parte superficial y almacenamiento subterráneo.

Por consiguiente, la ecuación del balance hídrico que se obtuvo para la microcuenca Quinahuaycu fue definida en la siguiente [ecuación \(A\)](#):

$$P - Q_s - FB - ET = \Delta S(t) \quad (A)$$

Como  $Q_s + FB = Q$ :

$$\Delta S(t) = \frac{d}{dt}(SM + TZ + SUZ + SLZ) \quad (D)$$

Como muestra, así se relacionan los principales flujos de la microcuenca Quinahuaycu con las variables del modelo, cierto es que, para obtener respuestas acordes a la realidad de la microcuenca mediante la ecuación (D), depende del grado de eficiencia que se logre en la calibración del modelo.

Para la resolución de la ecuación de balance hídrico, el modelo cuenta con 4 rutinas para resolver 9 parametrizaciones que se muestran en la Ilustración 9. En la versión básica,  $K_0=0$  y SUZ se eleva a un parámetro ALPHA.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad melt &= CFMAX(T(t) - TT) \\
 (2) \quad refreezing &= CFR \cdot CFMAX(TT - T(t)) \\
 (3) \quad \frac{recharge}{P(t)} &= \left( \frac{SM(t)}{FC} \right)^{BETA} \\
 (4) \quad E_{act} &= E_{pot} \cdot \min \left( \frac{SM(t)}{FC \cdot LP}, 1 \right) \\
 (5) \quad Q_{GW}(t) &= K_2 SLZ + K_1 SUZ + K_0 \max(SUZ - UZL, 0) \\
 (6) \quad Q_{am}(t) &= \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) Q_{GW}(t-i+1) \\
 \text{where } c(i) &= \int_{i-1}^i \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} du \\
 (7) \quad P(h) &= P_0 \left( 1 + \frac{PCALT(h-h_0)}{10000} \right) \\
 (8) \quad T(h) &= T_0 - \frac{TCALT(h-h_0)}{100} \\
 (9) \quad E_{pot}(t) &= \left( 1 + C_{ET} (T(t) - T_M) \right) E_{pot,M} \\
 \text{but } 0 &\leq E_{pot}(t) \leq 2 E_{pot,M}
 \end{aligned}$$

Ilustración 9: Parametrizaciones del modelo HBV-light. Fuente: (Seibert, 2005).

### 2.4.1. Componentes de la estructura Estándar versión Básica (EB)

Los componentes de la estructura estándar versión básica cuenta con cuatro componentes con sus respectivos parámetros de calibración. En la Ilustración 10 se muestra un diagrama que resume las rutinas del modelo aplicables al presente caso de estudio, por el cual determina los datos de entrada requeridos (input) y los datos de salida (output). En la Tabla 3 se describen los parámetros del modelo que deben ser calibrados para la zona de interés; por último, en la sección de metodología ([Calibración del modelo](#)), se detalla los valores de calibración para la microcuenca Quinahuaycu.

- **Rutina de humedad del suelo**

En la Ilustración 8, la caja del suelo representa la superficie del suelo, dónde ocurren los procesos de evapotranspiración y precipitación; a partir de la precipitación, se calcula la cantidad de agua que se almacena (humedad del suelo) y la cantidad de agua que se infiltra en el suelo (ecuación 3), también da como resultado la evapotranspiración real, computando cuando ETA alcanza ETo (ecuación 4).

- **Función de respuesta**

En la Ilustración 8, por debajo de la caja del suelo, existen dos reservorios lineales, los cuales representan los dos procesos de respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación, este proceso se resuelve con la parametrización (5). El primer reservorio lineal corresponde a la respuesta rápida o a la escorrentía directa, este reservorio se conecta con la caja de suelo mediante los procesos de capilaridad (CFRUX) como flujo de salida y la recarga de agua sub superficial (R) como flujo de entrada. La respuesta lenta de la cuenca



o el flujo base, corresponde al reservorio lineal inferior. A su vez, el reservorio superior (R1) se conecta al reservorio inferior (R2) mediante el proceso de percolación (PERC).

La ecuación característica de un reservorio lineal se basa en la ley de Darcy, la cual describe el movimiento del flujo a través de un medio poroso:

$$Q(t) = k * S(t)$$

Para obtener las relaciones de los reservorios lineales, se parte de la ecuación del balance hídrico, despreciando los procesos de precipitación y evapotranspiración (estos procesos ocurren en la caja del suelo).

$$P - Q(t) - ET = \Delta S(t)$$

$$Q(t) + \frac{dS(t)}{dt} = 0$$

Se reemplaza  $S(t)$  de la última ecuación, con los términos correspondientes de la ecuación del reservorio lineal  $S(t) = \frac{Q(t)}{k}$  y, por último, se resuelve la ecuación diferencial.

$$Q(t) + \frac{d}{dt} \frac{Q(t)}{k} = 0$$

$$Q(t) = Q(t_0)e^{-(t-t_0)k}$$

La escorrentía directa y el flujo base se definen como:

$$Q(1) = K1 * SUZ^{ALPHA}$$

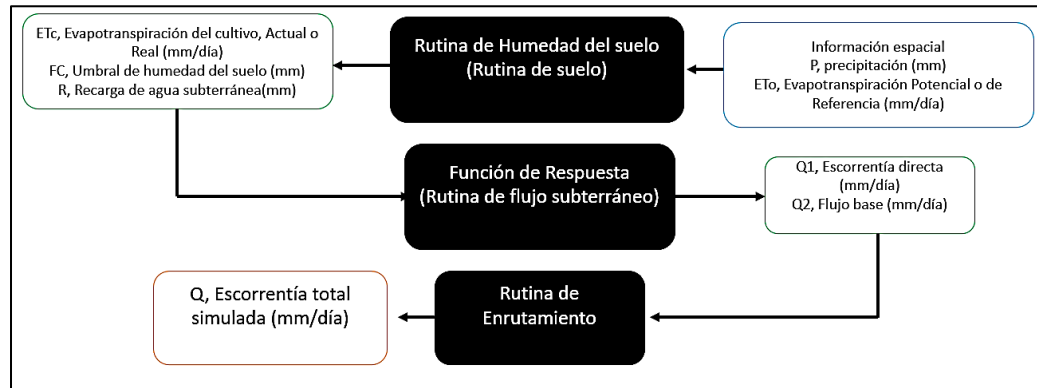
$$Q(2) = K2 * SLZ$$

Es importante resaltar que  $Q2$  no puede ser mayor a la percolación y  $SLZ$  no puede exceder  $PERC/K2$ .

- **Rutina de enrutamiento**

Los hidrogramas de un evento de precipitación constan de la escorrentía directa y el flujo base. La respuesta rápida,  $Q1$ , corresponde al caudal directo y la respuesta corta,  $Q2$ , es el flujo base. La Curva del caudal directo está desplazada en el tiempo con respecto a la curva del flujo base, es por este motivo que el modelo HBV-light calcula estos componentes en dos reservorios lineales con la función de respuesta. Para obtener los resultados y gráficas del modelo, los caudales de respuesta rápida y lenta son transformados mediante una función de peso triangular definido por el parámetro MAXBAS (ecuación 6) para dar como resultado el caudal simulado.

Las ecuaciones 7, 8 y 9 son para corregir datos de temperatura, precipitación y evapotranspiración. Estas 3 ecuaciones y sus parámetros asociados no son relevantes en la calibración del modelo para la microcuenca Quinahuaycu.



*Ilustración 10: Rutinas del modelo HBV-light aplicables a Quinahuaycu*

*Tabla 3: Parámetros importantes para la calibración del HBV-light en Quinahuaycu (Paso diario)*

S	U	Descripción	Observación	Rango valido
FC	Mm	Máxima humedad almacenada en el suelo	Rutina de Humedad del suelo	$(0, \infty)$
LP	Mm	Humedad umbral, por encima de la cual $ET_c = ET_o$		$[0,1]$
BETA	-	Contribución relativa de la lluvia o nieve derretida a la escorrentía		$(0, \infty)$
PERC	mm/día	Agua que penetra las capas profundas	Función de Respuesta	$[0, \infty)$
ALPHA	-	Coefficiente de no linealidad		$[0, \infty)$
k1	1/día	Constantes de recesión 1		$[0, 1)$
k2	1/día	Constantes de recesión 2	Rutina de Enrutamiento	$[0, 1)$
MAXBAS	día	Longitud de la función de ponderación triangular		$[1,100]$

Es importante mencionar que, los parámetros del modelo no son necesariamente igual a valores medidos en campo.

### 2.4.2. Eficiencia

La evaluación de la eficiencia del modelo HBV-light se realiza mediante funciones objetivo, criterios o índices de eficiencia. Estas funciones son medidas de bondad de ajuste aplicados a la hidrología estadística, se basan en el criterio de exactitud, miden el ajuste de la simulación con respecto a los datos observados, a partir de diferentes criterios (Cabrera, 2012).

Las funciones incorporadas en el modelo HBV-light y usadas para el presente estudio han sido estudiadas de: (Cabrera, 2012), (Seibert, 2005), (Montalván, 2017) y (Sucuzhañay & Céleri, 2018) y se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 4: Criterios de eficiencia

Simbología	Nombre	Rango	Simulación Perfecta	Nombre en HBV-light	Bondad de Ajuste adecuado para
Nash-Sutcliffe	Criterio de Eficiencia	$(-\infty, 1]$	1	Model Efficiency	Caudales pico
Nash-ln	Eficiencia por Ln(Q)	$(-\infty, 1]$	1	Efficiency using ln(Q)	Caudales bajos
Bias	Diferencia promedio, Error promedio o Sesgo	$(-\infty, \infty]$	0	Mean difference	Caudales promedio, estudiar balance hidrológico, estima error anual
R2	Coefficiente de Determinación	$[0,1]$	1	Coefficient of determination	Analizar la correlación entre datos simulados y observados

- **Nash-Sutcliffe**

En un criterio ampliamente usado para evaluar el rendimiento de los modelos hidrológicos, es decir, la habilidad de predicción del modelo con la predicción más simple posible, se toma como parámetro el valor promedio del caudal observado estimando cuánta de la variabilidad de las observaciones se explica mediante la simulación.

Los valores referenciales para el criterio de Nash-Sutcliffe son:

- <0.2: Insuficiente
- 0.2-0.4: Satisfactorio
- 0.4-0.6: Bueno
- 0.6-0.8: Muy Bueno
- >0.8: Excelente

$$\text{Nash Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Un valor de cero, indicaría que el modelo tiene la misma habilidad predictiva que la media de la serie de tiempo observada.

Este criterio presenta sensibilidad a valores extremos, por lo tanto, es el adecuado para representar los picos altos de caudales, mientras que los caudales bajos tienden a subestimarse. El efecto que tiene la optimización del modelo con este criterio, es desplazar la serie verticalmente.

- **Nash-ln o log (Q)**

Criterio que tiene el mismo efecto que Nash-Sutcliffe y es adecuado para representar caudales bajos; se aplica cuando los valores de la media simulada son altos y se busca reducir la sensibilidad para valores extremos.

$$\log (Q) = 1 - \frac{\sum(\log Q_{obs} - \log Q_{sim})^2}{\sum(\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{sim}})^2}$$

- **Bias**

Mide el error o diferencia del balance anual del volumen entre los caudales simulados y observados, con este criterio se calcula la sub o sobreestimación de la esorrentía simulada respecto a la observada. Es el criterio adecuado para simular los caudales promedio para análisis mensuales y anuales para estudiar el balance hidrológico (y con menos interés en los picos), el efecto de optimizar el modelo para este criterio, es desplazar la serie de forma horizontal.

$$\text{Bias} = \text{Observaciones Promedio} - \text{Valor de Referencia}$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})}{n} \quad 365$$

- **R2**

El coeficiente de determinación mide la correlación entre los caudales observados y los simulados, describe cuánto de la dispersión observada puede explicarse a partir de las predicciones.

$$R^2 = \frac{(\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}$$

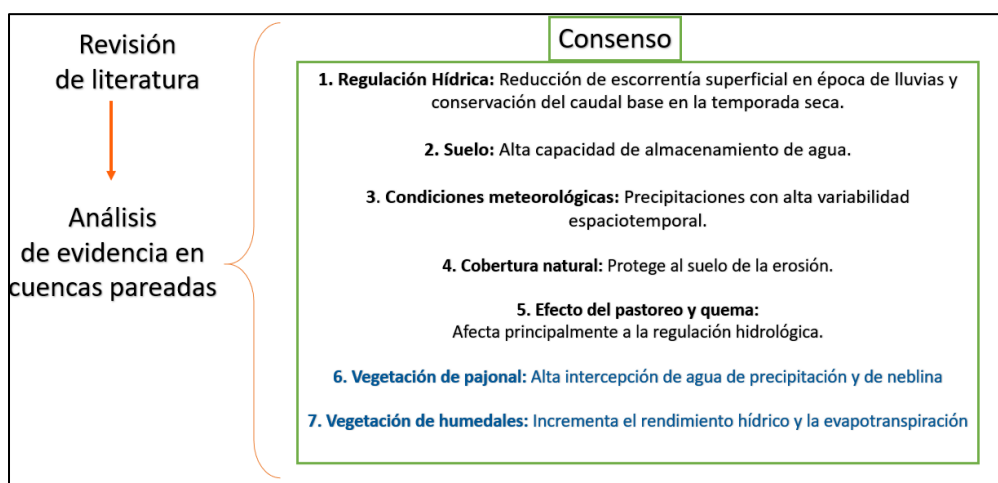
La evaluación de los parámetros del modelo, con la combinación de diferentes criterios, permite controlar el proceso de calibración (Cabrera, 2012). En el presente caso de estudio, la eficiencia del modelo en Quinahuaycu, fue evaluada aplicando un análisis multicriterio, asignando pesos a las funciones objetivo. Esto último se detalla en el capítulo de metodología ([3.5.3.](#)); es importante mencionar que, el proceso de calibración fue complementado con un análisis visual.

### 2.4.3. Limitaciones

El modelo HBV-light permite discretizar una cuenca hidrográfica en una cantidad máxima de 20 zonas de elevación y 3 zonas de cobertura vegetal. Para representar los suelos andinos del sur del Ecuador (poco profundos), se necesitan pocas zonas de elevación, sin embargo, 3 zonas de vegetación son una limitante para modelar zonas con varios tipos de vegetación o zonas con cultivos, esto restringe la aplicabilidad del modelo en el estudio del cambio de uso de suelo en cuencas con más de 3 coberturas vegetales relevantes.

### 3. METODOLOGÍA

En hidrología es común usar la metodología de cuencas pareadas para estudiar los efectos de las alteraciones en cuencas con características físicas y climatológicas similares y así obtener resultados generales. En el siguiente esquema se exponen conclusiones relevantes para la presente investigación, obtenidas en la revisión de literatura de estudios con metodología de cuencas pareadas y que mostraron consenso, es decir, en todos los estudios consultados se llegaron a las mismas conclusiones. Estas conclusiones generales conformaron las premisas para esta investigación ya que se estudió de forma específica la microcuenca Quinahuaycu.



*Ilustración 11: Premisas generales*

Las características físicas de la cuenca (3.1.), se estudiaron en base a lo expuesto en (Gutiérrez, 2014), (Breña & Villa, 2006), (Ibáñez et al., 2011) y (Ochoa, 2015c) y se obtuvieron con el software libre ARCGIS, a partir de datos de monitoreo de información geográfica y observaciones en campo.

El apartado (3.2), describe los criterios de selección de series temporales de precipitación y escorrentía; la metodología para la obtención de la serie de ETo, basada en la estandarización realizada por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en el artículo 56, Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO, 2006) y los métodos estadísticos para el análisis de datos planteados en Varas & Bois (1998).

El análisis de hidrogramas (3.3), se basa en los conceptos hidrológicos detrás del modelo precipitación-escorrentía HBV-light; conceptos que han sido estudiados de (Viessman et al., 1989), (Ven Te Chow et al., 1994), (Aparicio, 1992) y (Breña & Villa, 2006).

### 3.1. Cuenca Hidrográfica

Las características morfométricas y fisiográficas (uso de suelo, red de drenaje) de Quinahuaycu son las que establecen su respuesta hidrológica. Aparicio (1992) clasifica las características en dos tipos: las primeras que condicionan el volumen de escurrimiento como el área de la cuenca, tipo de suelo y las segundas que condicionan la velocidad de respuesta como el orden de corrientes, pendiente, cauces, etc. Es por este motivo que esta información se usa para comparar cuencas semejantes con poca información hidrometeorológica o para interpretar fenómenos que han ocurrido en el pasado (Gutiérrez, 2014).

#### 3.1.1. Características morfométricas

- **Área de drenaje (A)**

Área de la proyección horizontal de la divisoria topográfica

- **Perímetro (P)**

Longitud de la divisoria topográfica.

- **Longitud de la cuenca (L)**

Es la longitud axial o recta, desde la desembocadura, hasta el punto más alejado en la divisoria, siguiendo de forma “paralela” el cauce principal, también se conoce como longitud del máximo recorrido.

- **Ancho de la cuenca ( $W_{\mu}$ )**

Es el ancho medio de la cuenca, se obtiene al dividir el área de drenaje para la longitud recta.

$$W_{\mu} = \frac{A}{L}$$

- **Relieve**

Para estudiar el relieve, se realizó un mapa de elevaciones, un mapa de pendientes ([Anexo 8.1.](#)) y el gráfico del histograma de frecuencias altimétricas con la Curva Hipsométrica ([4.1. Estado Actual](#)). De la tabla de frecuencias altimétricas de Quinahuaycu ([Anexo 8.2.2.](#)), se puede obtener la altura media:

$$H\mu = \frac{\sum hi * ai}{A}$$

La pendiente media de la cuenca se relaciona con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución al flujo subterráneo, para su cálculo se usa el método de las cuadrículas asociadas a un vector con la ayuda de Arcgis.

$$S\mu = \frac{\sum ocurrencias * s\mu i}{Ocurrencias\ totales}$$

- **Coefficiente de Compacidad (Kc) o índice de Gravelius**

Relaciona el perímetro de la cuenca con la circunferencia de un círculo de igual área, si el índice se acerca a 1, la forma se asemeja a una circunferencia, mientras mayor es el índice, la forma es más irregular. Este coeficiente se relaciona con la capacidad de almacenamiento de agua, siendo mayor a medida que el coeficiente se acerca a la unidad.

$$Kc = \frac{P}{2\pi r}$$

$$Kc = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Tabla 5: Clasificación de Kc (POMCA, 2014b)

Clase	Rango	Clasificación
Kc1	1 a 1.25	Circular a oval-circular
Kc2	1.25 a 1.5	Oval- Oblonga
Kc3	>1.5	Oval-Oblonga a rectangular- oblonga

- **Factor de forma (Kf)**

Es la relación entre el ancho medio de la cuenca y su longitud axial. A menor coeficiente, la cuenca esta menos ligada a crecientes.

$$Kf = \frac{W\mu}{L}$$

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$



Tabla 6: Clasificación de Kf (POMCA, 2014b)

Rango	Clasificación
<1	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
1	Cuadrada
>1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

- **Histograma de frecuencia de elevaciones:** Indica el porcentaje de áreas comprendida entre dos alturas; con la ayuda del DEM de Quinahuaycu, se clasificó los intervalos de altura en 10 partes iguales, con un rango de 26 m aproximadamente.
- **Curva Hipsométrica**

Esta curva indica el porcentaje de área acumulada sobre una determinada cota e indica el deterioro de la cuenca.

### 3.1.2. Red hídrica

- **Orden de corriente**

También conocido como orden de la cuenca, es un procedimiento que jerarquiza la red fluvial, se usa el método de Strahler, en el cual, los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios y los cauces de segundo o mayor orden, se forman de la unión de dos cauces de igual orden n-1.

- **Longitud del curso principal (Lcp)**

Es la distancia entre la desembocadura y el nacimiento del cauce principal.

- **Densidad de drenaje (Dd)**

Es la relación entre la sumatoria de las longitudes de todos los cauces y el área total de drenaje. La densidad de drenaje es baja si Dd es menor a uno y la cuenca tiene un drenaje muy alto si el valor es mayor a 3.

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

- **Extensión media de la esorrentía superficial (I)**

Es la distancia media que una gota de agua tendría que recorrer en la cuenca, suponiendo una trayectoria recta desde donde cayó hasta el cauce más cercano.

$$I = \frac{A}{4L}$$

- **Sinuosidad (Sd)**

Es la relación entre la longitud del cauce principal y una longitud recta o curva medida sin cortar el cauce, los ríos se pueden considerar medianamente sinuosos a partir de valores superiores a 1.1.

$$Sd = \frac{Lc}{Lt}$$

- **Perfil del río principal**

Se elabora una tabla con puntos característicos del cauce principal ([Anexo 8.3.](#)) para graficar su perfil.

- **Pendiente media de Lcp (Jμ)**

La pendiente es un factor importante para estudiar avenidas súbitas, ya que a través de la velocidad del flujo de agua, acorta el tiempo de respuesta (Ochoa, 2015c). Se propone el método de cálculo de Tylor y Shawartz (1) y se contrasta este resultado con el cálculo de la pendiente media ponderada (2).

$$J_{\mu 1} = \left( \frac{Lcp}{\sum \frac{li}{\sqrt{ji}}} \right)^2$$

$$J_{\mu 2} = \frac{\sum Li * Ji}{A}$$

### 3.1.3. Uso de suelo y cobertura vegetal

El uso de suelo se estudió a partir de salidas a campo y a través de los archivos Shapes, de cobertura vegetal, facilitados por el área de geomática de PROMAS. En el [anexo 8.1.](#), se muestra el mapa de la cobertura vegetal de Quinahuaycu.

### 3.2. Discretización de la microcuenca Quinahuaycu

Con fundamento en los resultados de (Sucuzhañay & Céleri, 2018) y (Montalván, 2017) en los cuales demostraron que, el modelo distribuido presenta mayor rendimiento que el modelo puntual en el Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay; se decidió discretizar la zona de estudio en 3 zonas de elevación y 3 zonas de cobertura vegetal.

Debido a la limitante del modelo para clasificar la información en máximo 3 zonas de cobertura vegetal, se realizaron dos discretizaciones para estudiar 3 escenarios de cambio de vegetación: *Recuperación de Cobertura Natural, RCN*; *Aumento de Vegetación Herbácea, AVH* y *Aumento de Suelo Desertificado o Suelo Desnudo (ASD)*.

- **Zonas de Elevación**

La información de elevación fue clasificada en 3 intervalos iguales, a partir del MDE de Quinahuaycu. Para cada zona de elevación, se obtuvo el porcentaje de vegetación, extrayendo la información del mapa de cobertura vegetal, para cada zona correspondiente. La siguiente Ilustración muestra el proceso de análisis GIS.

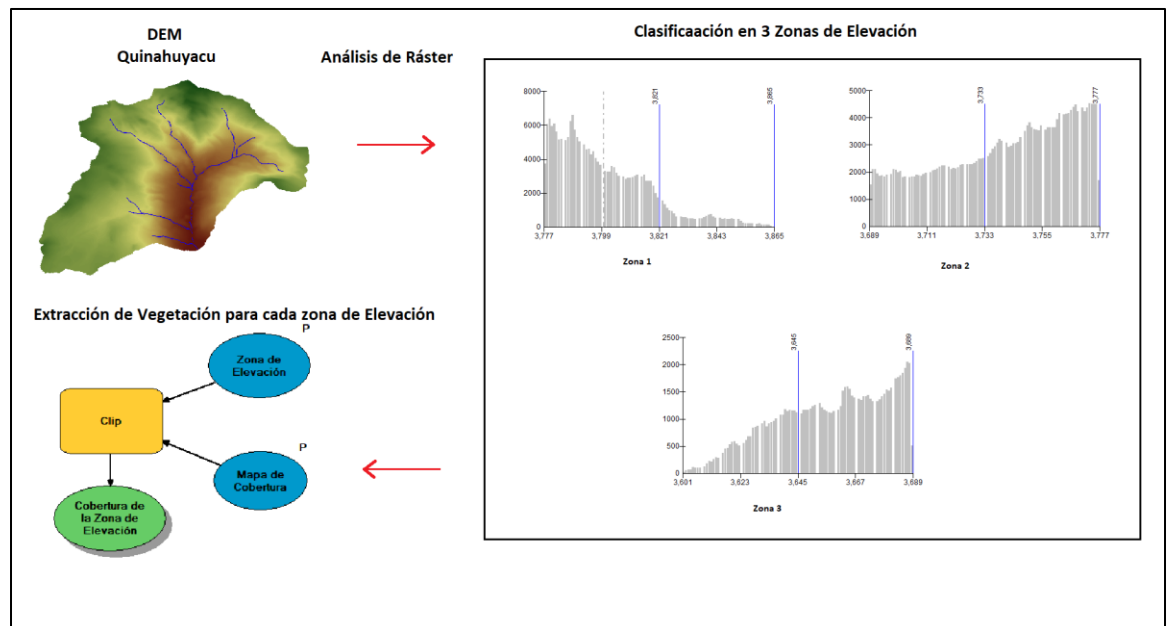


Ilustración 12: Procesamiento GIS para Discretización de Quinahuaycu

Tabla 7: Error Total en % de Vegetación

<b>% (Pajonal + Humedal + Vegetación Herbácea)</b>	<b>94.5</b>
<b>% Otro tipo de vegetación</b>	<b>3.8</b>
<b>% Total</b>	<b>98.2</b>
<b>Error</b>	<b>1.8</b>

- Zonas de Vegetación para Escenarios RCN y AVH:**

Como se puede comprobar, en los resultados respecto al uso del suelo y cobertura vegetal ([Estado Actual](#)), el porcentaje actual del pajonal, humedal y vegetación herbácea corresponden al 96% de la cobertura correspondientes a 473 ha, por lo tanto, el resto de la vegetación que representa el 4% de la cobertura de Quinahuaycu, fue excluida.

- Zonas de Vegetación para Escenario ASD**

Para estudiar el efecto del retiro de la de cobertura vegetal, se añade la zona de suelo desnudo y se suman las fracciones correspondientes a pajonal y humedal como zona de vegetación de páramo.

Tabla 8: Porcentajes de las 3 principales coberturas de Quinahuaycu

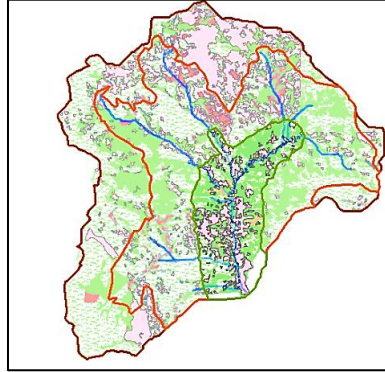
<b>RCN -AVH</b>			
<b>Elevación</b>	<b>Pajonales</b>	<b>Humedales</b>	<b>Vegetación Herbácea</b>
ZONA 1	0.212	0.064	0.103
ZONA 2	0.249	0.140	0.076
ZONA 3	0.048	0.064	0.044
<b>SUMA</b>	<b>0.508</b>	<b>0.268</b>	<b>0.224</b>
<b>ASD</b>			
<b>Elevación</b>	<b>Páramo</b>	<b>Vegetación Herbácea</b>	<b>SD</b>
ZONA 1	0.276	0.103	0.000
ZONA 2	0.389	0.076	0.000
ZONA 3	0.111	0.044	0.000
<b>SUMA</b>	<b>0.776</b>	<b>0.224</b>	<b>0.000</b>

La Tabla 9 muestra las características de la discretización corregida, estos valores fueron usados como datos de entrada de información espacial, para calibrar el modelo HBV-light en Quinahuaycu.

*Tabla 9: Discretización Quinahuaycu*

<b>Elev</b>	<b>Hmin</b>	<b>Hmax</b>	<b>Rango</b>	<b>H<math>\mu</math></b>	<b>Pajonales</b>	<b>Humedales</b>	<b>Vegetación</b>
	<b>msnm</b>	<b>Msnm</b>	<b>msnm</b>	<b>Msnm</b>	<b>% ha</b>	<b>ha</b>	<b>Herbácea</b>
							<b>Ha</b>
<b>Zona 1</b>	3777	3865	88	3780	21.2	6.4	10.3
<b>Zona 2</b>	3689	3777	88	3741	24.9	14	7.6
<b>Zona 3</b>	3601	3689	88	3658	4.8	6.4	4.4
<b>Suma</b>							100
<b>% otras</b>							0
<b>vegetaciones</b>							0
<b>% total</b>							100
<b>Error</b>							0

El mapa adjuntado en Anexos ([8.4](#)), muestra la discretización obtenida en la microcuenca Quinahuaycu, mediante el proceso descrito en este apartado.



*Ilustración 13: Discretización*

### 3.3. Análisis de series temporales

#### 3.3.1. Datos disponibles

En la Tabla 10 se muestra los porcentajes de los datos diarios disponibles, de los años 2018, 2019 y 2020, en las 5 estaciones en Quinahuayacu y en 3 estaciones pluviométricas cercanas. La estación RBL002PG fue excluida debido a que la escasez de datos aumenta la incertidumbre en la modelación hidrológica.

Tabla 10: % Datos

Estaciones de Quinahuayacu				Estaciones pluviométricas cercanas			
_Estación	2018	2019	2020	_Estación	2018	2019	2020
%Datos_RBL001PG	100	100	92	%Datos_IAM003PG	100	100	92
%Datos_RBL002PG	0	13	92	%Datos_IAM004PG	100	100	57
%Datos_IAM003HG	93	95	25	%Datos_VLR004PG	100	100	57
%Datos_RBL002HG	93	95	8				
%Datos_RBL003HG	93	84	25				

Los datos de entrada obligatorios en la estructura y versión elegida del modelo son: precipitación, caudal y evapotranspiración de referencia. Las series de P y Q se obtuvieron directamente de las estaciones de monitoreo, mientras que, la serie de ETo se estimó mediante la guía del artículo 56 de la FAO con el software ETo calculator. Los datos del año 2020 no se utilizan en la modelación ya que el registro de caudales es bajo (25%).

#### 3.3.2. Selección de poblaciones de precipitación y caudal

Las series elegidas en cada análisis se describen a continuación:

- Análisis de consistencia en registro de lluvias: Desde el 2018 hasta el 2020 de las estaciones RBL001PG, AIM003PG, IAM004PG y VLR004PG.
- Cálculo de la calibración del modelo HBV-light en Quinahuayacu: Desde el 2018 hasta 01 de julio del 2019 de las estaciones RBL001PG y IAM003HG.
- Validación del modelo: Segundo semestre del 2019 de las estaciones RBL001PG y HBV-light IAM003HG.

En el artículo de (Sucuzhañay & Célleri, 2018), se estudió el efecto de la calidad de los datos de precipitación y la distribución de los pluviómetros, en la calibración del modelo HBV-ligth y simulación de la esorrentía en un páramo. Sucuzhañay & Célleri (2018) afirma que, en las zonas de montaña una forma de monitoreo común es tener un solo pluviómetro en la salida de la cuenca, por este motivo, se modelaron 3 escenarios con información de lluvia de un solo pluviómetro, en la parte alta (E2), media (E3) y baja de (E4) asumiendo una lluvia uniforme en la cuenca.

Los resultados revelaron que, los escenarios con un solo pluviómetro logran eficiencias satisfactorias. El escenario E4 brindó el mejor rendimiento del modelo para el periodo de calibración, no obstante, el rendimiento se redujo en el periodo de validación, pudiendo deberse a las variaciones anuales que están fuertemente afectadas por factores orográficos.

En la microcuenca Quinahuaycu existe un pluviómetro en la zona alta y en la zona baja, no obstante, el pluviómetro de la zona alta tuvo que ser excluido del análisis por la falta de datos en los años 2018 y 2019. Por consiguiente, basados en los resultados encontrados en (Sucuzhañay & Célleri, 2018) la microcuenca Quinahuyacu se modeló con la información de la estación pluviométrica RBL001PG, ubicado en la parte baja, asumiendo la lluvia registrada como uniforme en la zona de estudio.

### 3.3.3. Obtención de serie diaria de ETo

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos:

- Evaporación del agua de las superficies como el suelo, cuerpos de agua y vegetación.
- Transpiración de la vegetación o, dicho de otra forma, la vaporización de agua de los tejidos vegetales y su expulsión a la atmósfera.

El término evapotranspiración de referencia ETo, se refiere a la máxima tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia (suelo totalmente cubierto por una vegetación estándar), que ocurre sin restricciones de agua y suponiendo condiciones óptimas para el desarrollo de la vegetación. También se lo interpreta como un parámetro climático que expresa el poder evaporante de la atmósfera de una determinada localidad y época del año (FAO, 2006).

Para el cálculo de ETo, la ecuación combinada Penman-Monteith es ampliamente recomendada ya que la ASCE (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles) y un equipo de la Comunidad Europea probaron 20 métodos en condiciones climáticas variables y concluyeron que, refleja exactitud tanto en climas áridos como húmedos (Ochoa, 2015c; Ochoa, 2015b).

El método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos porque tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos (FAO, 2006). Por último, el modelo HBV-light recomienda que, si no se cuenta con registros directos de evapotranspiración, esta se obtenga mediante la ecuación de Penman-Monteith.

La FAO, simplifica la ecuación de Penman-Monteith introduciendo constantes para un cultivo hipotético de pasto con una altura media de 0.12 m, resistencia superficial de 70

s/m, y un albedo de 0.23 (porcentaje de radiación que refleja una superficie respecto a la que incide sobre ella), la ecuación modificada por la FAO se describe a continuación:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

*Dónde:*

*ET<sub>o</sub>*: Evapotranspiración de referencia (mm/día)

*R<sub>n</sub>*: Radiación neta en la superficie de cultivo (MJ/m<sup>2</sup>.día)

*G*: Flujo de calor para el suelo (MJ/m<sup>2</sup>.día)

*T*: Temperatura promedio del aire a 2m de altura (°C)

*u<sub>2</sub>*: Velocidad del viento a 2m de altura (m/s)

*e<sub>s</sub>*: Presión de vapor de saturación (kPa)

*e<sub>a</sub>*: Presión real o actual de vapor (kPa)

*e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>*: Déficit de presión de vapor (kPa)

*Δ*: Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

*γ*: Constante psicrométrica (kPa/°C)

Los principales factores climáticos que intervienen en el cálculo de ETo por el método FAO Penman-Monteith son:

- Radiación solar
- Velocidad del viento
- Temperatura
- Humedad relativa

Se obtuvo una serie promedio de ETo diaria para un año hidrológico, con la ayuda del software desarrollado por la FAO, ETo calculator, para los datos históricos (2005-2018) de la estación meteorológica (IAM001M) de Quinahuaycu. El modelo HBV-light devuelve como resultado la Evapotranspiración actual, real, o del cultivo ETc. Este parámetro se usó como un indicador en la variación de la demanda de agua de la microcuenca Quinahuaycu.



### 3.3.4. Consistencia en registro de lluvias

- **Curva de doble masa**

La curva de doble masa se usa para detectar inconsistencias en los datos, se realiza a partir de acumulaciones anuales de precipitación. Se grafica las precipitaciones acumuladas anuales en una estación de interés vs el promedio de otras estaciones cercanas, la inconsistencia se representa como un cambio de pendiente en la curva. El factor de ajuste de inconsistencia es:

$$K = \frac{\text{Pendiente del tramo posterior al cambio}}{\text{Pendiente del tramo anterior al cambio}}$$

### 3.3.5. Estadística de datos

Para analizar las series de datos temporales de precipitación y caudal se usaron algunos conceptos estadísticos:

- **Medidas posición:**

Muestran la tendencia de los datos y pueden clasificarse en medidas de tendencia central y medidas de posición no centrales. Para la presente investigación la serie de datos se estudió de forma anual y mensual con el objetivo de identificar meses lluviosos.

Entre las medidas de tendencia central se estudió la media aritmética ( $\mu$ ) o promedio y la mediana (**Q2**). Se debe tener en cuenta que la media aritmética es sensible a los valores grandes de los datos, lo que puede resultar en un sesgo con respecto a su distribución, por esto es necesario estudiar medidas no centrales y de dispersión. Para estudiar la posición no central de las poblaciones se obtuvieron diagramas de cajas para representar de forma gráfica el valor mínimo; el cuartil uno (**Q1**), que corresponde al 25% de los datos; el cuartil dos (**Q2**) o mediana, que es el valor medio o sobre el cual está el 50% de los valores de los datos, y el cuartil tres (**Q3**), que corresponde al 75% de los datos y el valor máximo.

$$\mu = \frac{\sum xi}{N}$$

$$Q1 = q1 \rightarrow Ni \geq \frac{N}{4}$$

$$Q2 = q \rightarrow Ni \geq \frac{N}{2}$$

$$Q3 = q3 \rightarrow Ni \geq \frac{3N}{4}$$

- **Medidas de dispersión**

Se obtuvo la desviación estándar ( $\sigma$ ) anual y mensual de los datos, así como el coeficiente de variación de Pearson (**CV**). La desviación estándar se usa para comparar poblaciones ya que mide la distribución de los datos, representa el promedio de la dispersión de la serie de datos en relación con su media. El coeficiente de variación de Pearson mide el nivel de desviación respecto al promedio, si se obtienen valores cercanos a cero corresponden a valores concentrados con poca variación y si los valores son cercanos a la unidad, denotan valores muy dispersos, por lo tanto, la media aritmética no es confiable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \mu)^2}{N}}$$

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu}$$

*Dónde:*

*xi: Valor i de la serie de datos*

*N: Número total de datos*

*Ni: Posición i de la serie de datos*

### **3.4. Análisis de Hidrogramas**

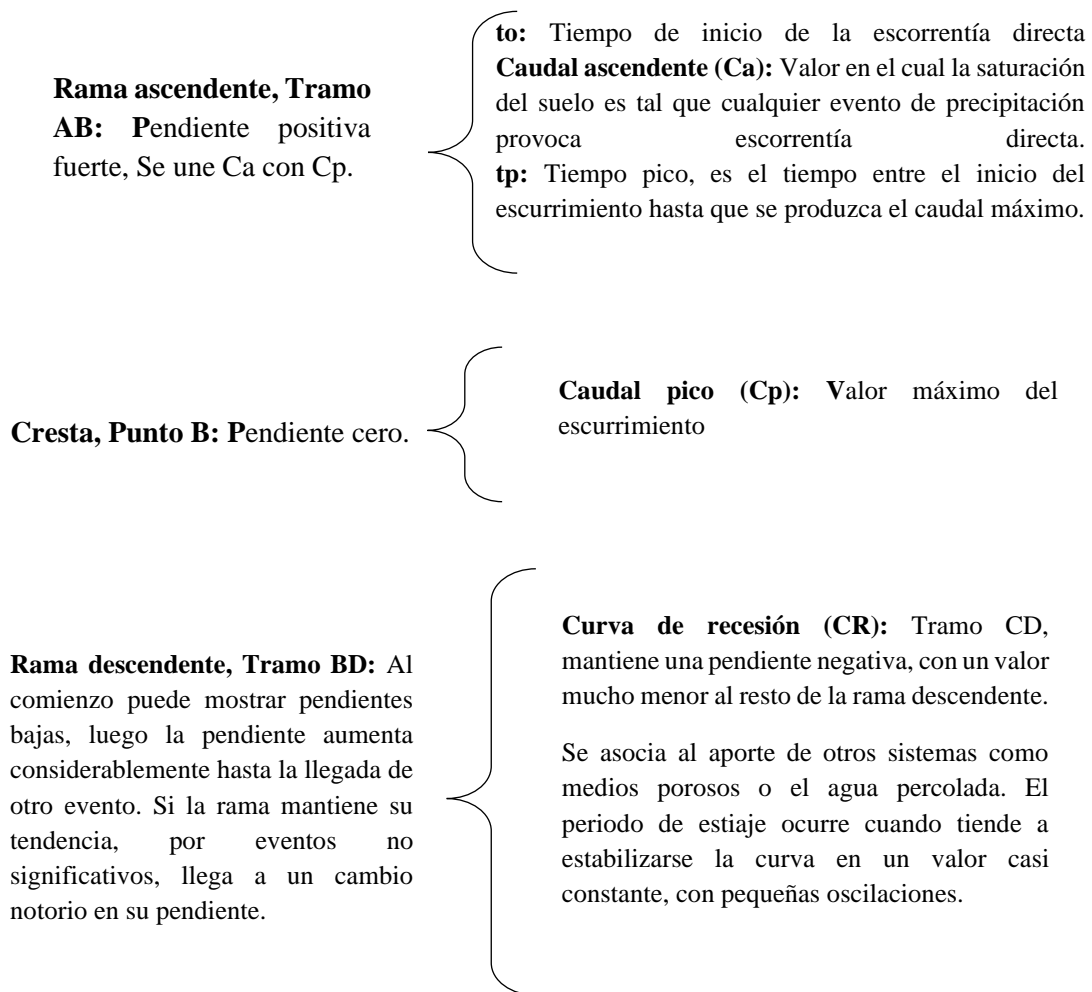
#### **3.4.1. Relación precipitación- escorrentía**

La relación entre precipitación y escorrentía se puede resumir de la siguiente forma: “La precipitación neta o en exceso, es igual a la escorrentía directa. Además, toda precipitación provoca crecidas en los ríos y cuando se excede la capacidad del cauce se generan inundaciones”. Los gráficos hidrológicos más importantes que estudian esta relación son: el hietograma y el hidrograma. Por un lado, los hietogramas son gráficos de barras que representan la lluvia, en altura de agua o en intensidad con respecto al tiempo. Simultáneamente, los hidrogramas representan la variación del caudal en el tiempo y el volumen de agua que escurrió en un intervalo determinado, equivale al área bajo la curva de dicho intervalo de tiempo.

Para el presente estudio, las series de tiempo de precipitación (hietogramas) se usan como datos de partida para el análisis de los hidrogramas anuales mediante el modelo HBV-light.

### 3.4.2. Componentes del hidrograma

El escurrimiento se compone del agua que circula sobre o bajo la superficie del terreno y llega a una corriente para finalmente ser drenada en la salida de la cuenca. Lo que determina la magnitud de las crecidas de los ríos, es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta, o tiempo de concentración, **tc**. Los componentes del hidrograma se esquematizan en la Ilustración 14.



*Ilustración 14: Componentes de un hidrograma*

El tiempo base, **tb**, es el tiempo en el que ocurre el escurrimiento directo, el volumen que escurrió en un determinado evento puede ser expresado como:

$$\int_{t_0}^{t_0+tb} Q(t)dt = \int_{t_0}^{t_0+tb} Qd(t) + \int_{t_0}^{t_0+tb} FB(t)dt$$

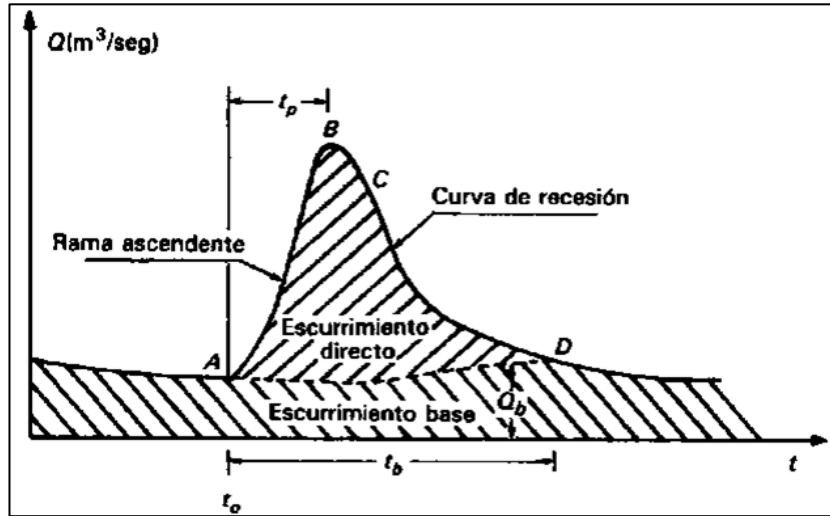


Ilustración 15: Hidrograma aislado de una tormenta. Fuente: (Breña & Villa, 2006).

### 3.4.3. Separación de flujos

Para separar el flujo base de la escorrentía directa de un evento, es necesario conocer todo el gasto antecedente, **Qa**, su inicio (**t₀**) y el punto donde termina la curva de recesión (**D**), este punto también es el comienzo de la curva de agotamiento, curva de abatimiento normal o curva maestra de recesión del flujo base (**CMR**).

El modelo HBV-light resuelve la separación de flujos mediante dos procesos de reservorio lineal, que se detallan en el apartado de Materiales ([Modelo HBV-light](#)). La curva de recesión del flujo base del modelo, tiene la forma del decaimiento exponencial:

$$Q(t) = Q(t_0)e^{-(t-t_0)/k}$$

Esta ecuación se puede linealizar aplicando logaritmos:

$$\ln(Q(t)) = \ln(Q(t_0)) - k(t - t_0)$$

El valor de K representa la pendiente de la curva de recesión o también llamada constante de recesión.

### 3.5. Modelación de Escenarios de Cambio de Vegetación

En la Ilustración 16 se muestra el diagrama de flujo del proceso iterativo realizado para la calibración y validación del modelo HBV-light en Quinahuyacu. La dirección roja representa la iteración final, en la cual se obtuvieron los parámetros óptimos del modelo y a partir del modelo calibrado con estos parámetros, se simularon los siguientes escenarios de cambio en la cobertura vegetal:

- Recuperación de Cobertura Natural (**RCN**)
- Aumento de Vegetación Herbácea debido a pastoreo (**AVHp**)
- Aumento de Suelo Desnudo (**ASD**)

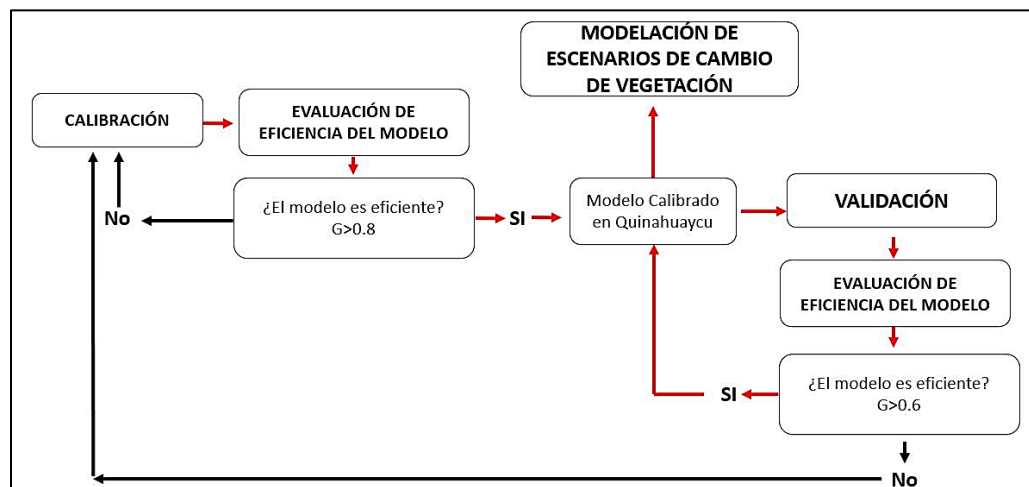


Ilustración 16: Diagrama de Flujo de la Modelación

### 3.5.1. Calibración

Es el proceso de identificación de los parámetros del modelo, para los cuales la escorrentía simulada se ajusta de manera óptima (minimizando diferencias) a la observada (Cabrera, 2012). El proceso de calibración del modelo HBV-light en la microcuenca Quinahuaycu, tuvo como finalidad encontrar valores de los parámetros de tal forma que, se minimicen el sesgo (Bias) y se maximice la eficiencia del modelo. La evaluación de la bondad de ajuste de los parámetros, fue realizada con una función multiobjetivo o función objetivo G, descrita en el apartado [3.5.3](#).

Retomando las ideas principales del apartado de modelación hidrológica ([1.3](#)): los modelos de precipitación-escorrentía, conceptuales y distribuidos, se componen de una parte perceptual, que se basa en la comprensión humana del ecosistema y los métodos que se usen para monitorear las variables Hidro climáticas en campo; una parte matemática, en la cual se resuelven determinadas ecuaciones paramétricas del balance hidrológico en las que se base el modelo y la parte computacional, correspondiente a los algoritmos de los softwares usados para resolver dichas ecuaciones paramétricas.

En el caso puntual de HBV-light, el modelo perceptual de los ecosistemas de montaña se esquematiza como reservorios lineales en serie, en donde cada reservorio tiene características específicas de elevación y cobertura vegetal.

Dicho lo anterior y para cumplir con el objetivo general de la presente tesis, el modelo HBV-light debe ser calibrado en Quinahuaycu de tal forma que, la ecuación del balance hidrológico para esta zona, obtenida en el apartado ([1.2.2.](#)), **ecuación A**, pueda ser resuelta con un buen grado de exactitud, mediante los parámetros de las ecuaciones del balance hidrológico del modelo matemático de HBV-light, **ecuación C**.

$$P - Q_s - FB - ET = \Delta S(t) \quad (A)$$

$$P - Q - ET = \frac{d}{dt}(SM + TZ + SUZ + SLZ) \quad (C)$$

Es de esta forma, como para la calibración fue necesario contar con los resultados de los métodos descritos en el capítulo de metodología ([3.1, 3.2, 3.3 y 3.4](#)), como se vio en el apartado de modelación hidrológica ([1.3](#)); la razón es que, para que el modelo represente de forma real el ecosistema de Quinahuaycu, la información de entrada del modelo debe ser la más cercana posible a la realidad. Por lo tanto, la información resultante de los métodos descritos en ([3.1, 3.2, 3.3 y 3.4](#)) se han considerado la parte más importante para probar la hipótesis de la presente tesis. En la Ilustración 16 se esquematiza un diagrama de flujo de los subprocesos de la calibración del modelo

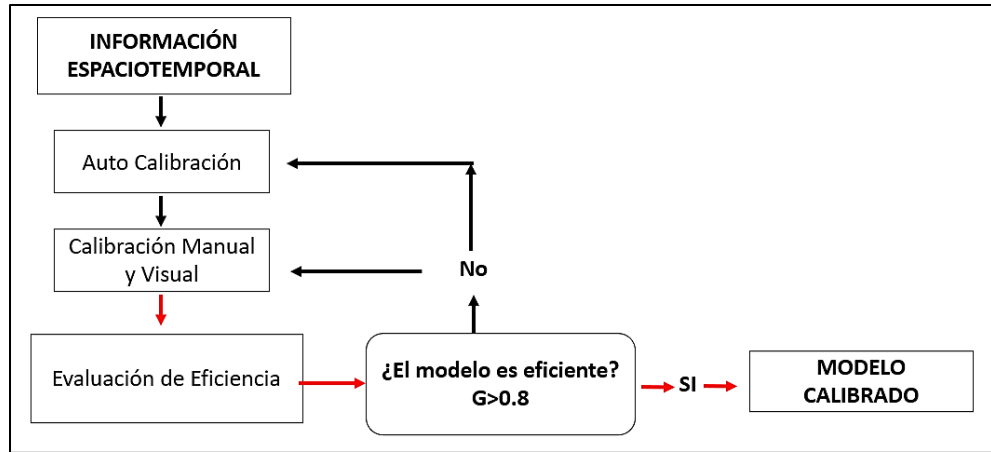


Ilustración 17: Diagrama de Flujo de la Calibración

- **Auto Calibración**

El método Montecarlo es un proceso que genera números aleatorios simulando casos de estudio, con los cuales se pueden hacer una alta cantidad de pruebas y cálculos para probar hipótesis. El método Monte Carlo viene integrado como una herramienta del modelo HBV-light.

La auto calibración se realizó con el siguiente procedimiento: los rangos iniciales para calibrar el modelo HVB-light en Quinahuyacu, se tomaron en base a (Sucuzhañay & Céleri, 2018), estos fueron obtenidos después de simular 10,000 veces 7 números aleatorios de una distribución normal. Por último, se guardaron los parámetros que presentaron una eficiencia alta ( $>0.6$ ).

Tabla 11: Rango de parámetros para auto calibración

Simbología	Mínimo	Máximo
FC	250	400
LP	0.5	1
BETA	1	3
PERC	0	2
ALPHA	0	1
k1	0.999	0.999
k2	0.066	0.2
MAXBAS	1	1.5

- **Calibración Manual y Visual**

Los valores de los parámetros (auto calibrados), se ajustaron de forma manual y visual hasta optimizar la eficiencia del modelo mediante el criterio del balance hidrológico. La evaluación se realiza mediante las funciones objetivo, estas miden la eficiencia del modelo estimando la incertidumbre de los caudales simulados respecto a los observados. Las funciones objetivos incorporadas en el modelo HBV-lights, y usadas para analizar los resultados del proceso de calibración en la microcuenca Quinahuaycu se describen en [\(2.4.2\)](#).

### 3.5.2. Validación

En el proceso de validación, se utilizan los parámetros encontrados en la calibración, para correr el modelo con una serie nueva de datos, con la condición de que no hayan sido utilizados en el proceso previo (Montalván, 2017). La serie de datos usados para este proceso, corresponden al segundo semestre del 2019.

### 3.5.3. Evaluación de Parámetros

La evaluación para aceptar los parámetros obtenidos en el proceso de calibración se realizó planteando la función objetivo **G**. Maximizar el valor de **G** corresponde a minimizar el sesgo o error promedio (Bias) y maximizar la eficiencia del modelo (Nash-Sutcliffe). Es importante señalar que, **G** fue pensada para cumplir con el objetivo del estudio, analizar el balance hidrológico; por lo tanto, **G** puede ser modificada en función del tipo de estudio que se desee hacer, como ejemplo, para estudiar sequías, resulta lógico optimizar el modelo para el log (Q).

- **Función objetivo**

$$G = W1 + W2$$

$$G \in [0,1]$$

***Si  $G > 0.8$  en la calibración y  $G > 0.6$  en la validación,  
se aceptan los parámetros***

- **Valores de W1**

$$W1 = 0 \text{ si } F01 < 0.5$$



$$W1 = 0.2 \text{ si } 0.5 \leq F01 < 0.6$$

$$W1 = 0.3 \text{ si } 0.6 \leq F01 < 0.7$$

$$W1 = 0.5 \text{ si } F01 \geq 0.7$$

- **Valores de W2**

$$W2 = 0 \text{ si } F02 \geq 25\%$$

$$W2 = 0.2 \text{ si } 15\% \leq F02 < 25\%$$

$$W2 = 0.3 \text{ si } 5\% \leq F02 < 15\%$$

$$W1 = 0.5 \text{ si } F01 \leq 5\%$$

*Dónde:*

*W1: Peso asignado para la eficiencia del modelo*

*W2: Peso asignado por la optimización para balance de volumen*

*Fo1: Función objetivo Nash-Sutcliffe*

*Fo2: Función objetivo: Error promedio Bias*

La evaluación de los parámetros en el proceso de validación, es importante para verificar que los parámetros calibrados simulen con eficiencia nuevos datos. Esta evaluación fue realizada con la misma metodología ya descrita. Sin embargo, para aceptar los parámetros, se propuso disminuir el valor umbral de G a 0.6 (**G>0.6**). Esto último debido a que, los modelos en los que se usa información de un solo pluviómetro, ubicado en la parte baja de la cuenca, tienden a simular la escorrentía con un buen rendimiento en la calibración pero un rendimiento menor en la validación, debido a la variación espacio-temporal anual de la precipitación, la cual está influenciado directamente por los factores orográficos en los sistemas montañosos (Sucuzhañay & Céleri, 2018).

Una vez obtenidos los parámetros óptimos para la función objetivo G, se evaluaron los valores para 4 criterios de eficiencia y se obtuvo el promedio de los 4 criterios, tanto para el proceso de calibración como para el de validación. Los criterios de eficiencia usados son:

- Nash-Sutcliffe
- R2
- log(Q)

- Eff-Bias

Los 3 primeros criterios se obtuvieron como resultados del modelo HBV-light y se detallan en el apartado [2.4.2.](#); el cuarto criterio, Eff-Bias, parte de los resultados del modelo con respecto al sesgo o error promedio (Bias) y se calculó aplicando la siguiente relación:

$$Eff - Bias = 1 - \frac{\%Bias}{100}$$

Dónde:

$$\%Bias = \frac{Bias}{Qobs} * 100$$

#### 3.5.4. Simulación de escorrentía

- Escenarios RCN y AVH

Para estudiar la escorrentía y su relación con la vegetación de Quinahuaycu, los escenarios RCN y AVH de cambio de cobertura vegetal, fueron planteados en base a una tasa anual de pérdida de páramo en Quinahuaycu. En la investigación realizada por Crespo, et al. (2014), basada en los estudios realizados por la Universidad de Cuenca, desde el año 2000 hasta el 2008, se tomó como testigo a la microcuenca Quinahuaycu, por considerarla una microcuenca natural, para comparar otras zonas alteradas con pastoreo y cultivos.

En esta investigación se expone que los porcentajes de cobertura vegetal en Quinahuaycu corresponden a un 78% pajonal, 20% Almohadilla o Humedales y 2% Vegetación Arbustiva. En comparación con la información actual 2017-2020, se registra una pérdida del 23% de la cobertura natural del páramo (Estado Actual: %Inicial Pajonal+% Inicial Humedal=75%). Si bien en el estudio de (Crespo et al., 2014) ya que no se especifica el año de la información de los porcentajes de cobertura vegetal, se pueden asumir dos escenarios; uno considerando que la información se basa en el año 2000 y otro considerando que, el inicio del estudio en Quinahuaycu en el 2006, se corresponde con la información de la vegetación. Como resultado se obtienen dos escenarios de pérdida, uno con una tasa del 1.3% anual para el periodo 2000-2018 y del 2% para el periodo 2006-2018. Para el presente estudio, se opta por trabajar con la tasa de 2% de pérdida anual debido a que representa el escenario pesimista de pérdida de páramo en la zona de estudio.

- Escenario ASD

Para estudiar el impacto hídrico que causa la pérdida de territorio de páramo por retiro de cobertura vegetal, se planteó un escenario de aumento de suelo desertificado o suelo desnudo hasta el 15% con una tasa del 1% al día. Plantear una tasa rápida de pérdida

de territorio de páramo es congruente para evaluar el efecto de actividades mineras ilegales o con poca responsabilidad ambiental y social, ahora bien, es crucial señalar que existen formas de minería no invasivas que se aplican con criterios ambientales y que representan beneficios para las comunidades en las zonas de influencia de proyectos mineros, sin embargo, profundizar en los tipos de actividades mineras está fuera del alcance de la presente investigación, por este motivo el escenario ASD, se estudia como un escenario general de aumento de suelo desnudo, que también puede ser causado por las quemas y la expansión de la frontera agrícola.

Por último, es importante tener en cuenta que el aumento o disminución de cierto tipo de vegetación para los escenarios planteados, fueron distribuidos de forma proporcional en las 3 zonas de elevación, según los porcentajes actuales de área de las 3 zonas de vegetación. Este análisis discretizado resulta en 9 subdivisiones de área de vegetación en la microcuenca Quinahuaycu, estas deben sumar siempre un valor de 1 para correr el modelo.

### 3.5.5. Escenario RCN

En el Escenario de Recuperación de Cobertura Natural, el objetivo fue estudiar el balance hidrológico de Quinahuaycu, recuperando la vegetación del páramo en un 100%. Esto se realizó comparando los resultados de las simulaciones con los resultados del Balance Hídrico del Estado Actual (4.2.3.). La siguiente metodología fue llevada a cabo:

- A partir de los datos de discretización de Quinahuaycu, en 3 zonas de elevación y 3 zonas de cobertura vegetal (3.2.), se obtuvieron factores de proporcionalidad para el pajonal y para el humedal. Estos factores sirvieron como pesos para distribuir el porcentaje de disminución de Vegetación Herbácea (VH) entre el pajonal y humedal y se obtuvieron aplicando la siguiente relación:

$$FP_{Pajonal}^i = \frac{Pajonal_{Disc}^i}{\sum Pajonal_{Disc}^i + \sum Humedal_{Disc}^i}$$

$$FP_{Humedal}^i = \frac{Humedal_{Disc}^i}{\sum Pajonal_{Disc}^i + \sum Humedal_{Disc}^i}$$

Tabla 12: Factores de Proporcionalidad para aumento o reducción de vegetación

Pajonal_Disc	Humedal_Disc	VH_Disc	FP_Pajonal	FP_Humedal
0.212	0.064	0.103	0.7671	0.2329
0.249	0.140	0.076	0.6402	0.3598
0.048	0.064	0.044	0.4266	0.5734

- El porcentaje de área de VH, para cada zona de elevación y en cada simulación, depende de la disminución de VH y se obtuvo con la siguiente relación:

$$VH_{Mod}i = \frac{VH_{Disc}i}{\sum VH_{Disc}i} * VH_{Mod}T$$

$$VH_{Mod}T = \sum VH_{Disc}i - \%Cambio_{VH}$$

$$VH_{Cambio}i = |VH_{Disc}i - VH_{Mod}i|$$

- Comprobación:

$$\sum VH_{Mod}i = \%Cambio_{VH}$$

Dónde:

$FP_{Pajonal}i$ : % de Pajonal, excluyendo VH, en la zona de elevación  $i$ ; con  $i \in [1,3]$ .

$FP_{Humedal}i$ : % de Humedal, excluyendo VH, en la zona de elevación  $i$ ; con  $i \in [1,3]$ .

$VH_{Mod}i$ : % de Vegetación Herbácea, para la simulación, en la zona de elevación  $i$ ; con  $i \in [1,3]$ .

$VH_{Mod}T$ : % Total de área de VH para la simulación.

$VH_{Cambio}i$ : % De disminución de VH, en la simulación, en la zona de elevación  $i$ ; con  $i \in [1,3]$ .

$\frac{VH_{Disc}i}{\sum VH_{Disc}i}$ : % de VH de la discretización, en la zona de elevación  $i$ ; con  $i \in [1,3]$ .

De los factores  $FP_{Pajonal}i$ ,  $FP_{Humedal}i$  y  $VH_{Mod}i$ , dependen las áreas modeladas para cada simulación, por lo tanto, el número de cuadros de áreas modelados es igual a la suma de cada cambio en la VH simulada. En este caso, la discretización en 3 zonas de elevación dio como resultado un 22.4% de VH, para recuperar al 100% la Cobertura Natural de Páramo, se disminuye la VH con una tasa del 2% hasta llegar a 0%; esto representa 11 simulaciones dentro del Escenario RCN.

- El cambio de cobertura se calculó con las siguientes relaciones:

$$Aumento_{Pajonal}i = FP_{Pajonal}i * VH_{Cambio}i$$

$$Aumento_{Humedal}i = FP_{Humedal}i * VH_{Cambio}i$$

$$Pajonal_{Modelado}i = Aumento_{Pajonal}i + Pajonal_{Disc}i$$

$$Humedal_{Modelado} = Aumento_{Humedal}i + Humedal_{Disc}i$$

La siguiente Tabla se corresponde con la simulación 11 y representa el escenario de Recuperación de Cobertura Natural al 100%, se puede comprobar que, la VH es del 0% en las 3 zonas de elevación.

Tabla 13: Escenario de Modelación RCN al 100%

ESCENARIO RCN Disminución de VH:			0.224	VH modelado total:		0		
VHDisc	VHMod	VHCambio	Aumento de Pajonal	Aumento de Humedal	Aumento de Páramo	Pajonal Modelado	Humedal Modelado	VH Modelado
0.103	0.0	0.103	0.0793	0.0241	0.103	0.291	0.088	0.000
0.076	0.0	0.076	0.0490	0.0275	0.076	0.298	0.167	0.000
0.044	0.0	0.044	0.0189	0.0253	0.044	0.066	0.089	0.000
<b>0.224</b>	<b>0.0</b>	<b>0.224</b>		<b>%Aumento Páramo=</b>	<b>0.224</b>		<b>1.000</b>	

- Comprobación:

$$Aumento_{Pajonal} i + Aumento_{Humedal} i = VH_{Cambio} i$$

### 3.5.6. Escenario AVH

Para simular escenarios de aumento de vegetación herbácea, se sigue el mismo procedimiento que el descrito anteriormente, para la recuperación de cobertura natural. La diferencia en las fórmulas se relaciona con los signos, ya que el objetivo del escenario AVH es estudiar el aumento de la vegetación herbácea mientras se disminuye proporcionalmente el territorio de páramo. A continuación, se puntualiza la diferencia en las fórmulas.

$$VH_{ModT} = \sum VH_{Disc}i + \%Cambio_{VH}$$

$$Disminución_{Pajonal} i = FP_{Pajonal}i * VH_{Cambio}i$$

$$Disminución_{Humedal}i = FP_{Humedal}i * VH_{Cambio}i$$

$$Pajonal_{Modelado}i = Pajonal_{Disc}i - Disminución_{Pajonal} i$$

$$Humedal_{Modelado} = Humedal_{Disc}i - Disminución_{Humedal} i$$

- Comprobación:

$$Disminución_{Pajonal} i + Disminución_{Humedal} i = VH_{Cambio}i$$

El escenario AVH se compuso por 16 simulaciones, se partió de la discretización actual de 22.4%, hasta llegar al 55%, con una tasa anual de incremento del 2%. Esto supone que para el año 2030, la VH aumentará un 32.6% hasta llegar a ser el 55% de la vegetación de Quinahuaycu.

Finalmente, la Tabla 14 muestra la simulación 16, que representa la discretización de la vegetación con una VH del 55% del área de Quinahuaycu.

Tabla 14: Escenario de Modelación AVH al 55%

ESCENARIO AVH			Aumento de VH:	0.326	VH modelado total	0.550	
VHDisc	VHMod	VHCambio	Dism de Pajonal	Dism de Humedal	Pajonal Modelado	Humedal Modelado	VH modelado
0.103	0.254	0.150	0.1154	0.0350	0.096	0.029	0.254
0.076	0.188	0.111	0.0713	0.0400	0.178	0.100	0.188
0.044	0.108	0.064	0.0274	0.0369	0.020	0.027	0.108
<b>0.224</b>	<b>0.5</b>	<b>0.326</b>	<b>Suma Total</b>			<b>1.000</b>	

### 3.5.7. Escenario ASD

El escenario ASD se compuso de 12 simulaciones con una tasa de aumento de SD del 1% diario, se siguió una metodología similar a los escenarios anteriores, en la Tabla 13 se muestra la discretización para la simulación 12. A continuación, se resumen las relaciones usadas.

- Factores de Proporcionalidad:

$$FP_{Páramo i} = \frac{Páramo_{Disc i}}{\sum Páramo_{Disc i} + \sum VH_{Disc i}}$$

$$FP_{VH i} = \frac{VH_{Disc i}}{\sum Páramo_{Disc i} + \sum VH_{Disc i}}$$

Tabla 15: Factores de Proporcionalid para aumento de SD

Páramo Discretizado	VH_Disc	SD_Disc	FP_Páramo	FP_VH
0.276	0.103	0	0.728	0.272
0.389	0.076	0	0.836	0.164
0.111	0.044	0	0.716	0.284

- Vegetación Simulada:



$$SD_{Modelado} = \%Cambio_{SD} * (Páramo_{Disc} + VH_{Disc})$$

$$VH_{Modelado} = VH_{Disc} - FP_{VH*SD_{Modelado}}$$

$$FP_{VH*SD_{Modelado}} : \text{Dism proporcional de VH}$$

$$Páramo_{Modelado} = Páramo_{Disc} - FP_{Páramo*SD_{Modelado}}$$

$$FP_{Páramo*SD_{Modelado}} : \text{Dism proporcional de Páramo}$$

- Comprobación:

$$SD_{Modelado} = \text{Dism proporcional VH} + \text{Dism proporcional Páramo}$$

Tabla 16: Escenario ASD 12%

ESCENARIO ASD		Aumento de SD:		0.12		
SD Mod	SD Cambio	Dism Páramo	Dism VH	Páramo Mod	VH Mod	SD Mod
0.04547	0.04547	0.0331	0.0124	0.243	0.091	0.045
0.05585	0.05585	0.0467	0.0092	0.340	0.067	0.056
0.01868	0.01868	0.0134	0.0031	0.098	0.041	0.019
<b>0.120</b>	<b>0.120</b>	<b>0.093</b>	<b>0.025</b>	<b>0.681</b>	<b>0.199</b>	<b>0.120</b>
Suma Total					<b>1.000</b>	

Por último, para estudiar el impacto en el balance hidrológico en los escenarios de cambio de vegetación, se estudiaron los siguientes índices hidrológicos:

- Curva de duración de caudales (FDC)
- Coeficiente de escorrentía
- Caudales pico

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Eficiencia del modelo para balance de volumen

Se calibró el modelo minimizando los errores promedios de los caudales (Bias), usando como criterio de aceptación de los parámetros, la función objetivo (**G**), planteada en el tópico [3.5.3](#). Los parámetros se aceptaron con la siguiente condición:  $G > 0.8$  para el proceso de Calibración y  $G > 0.6$  para el proceso de Validación. Los resultados para los dos procesos se pueden ver en la Ilustración 18.

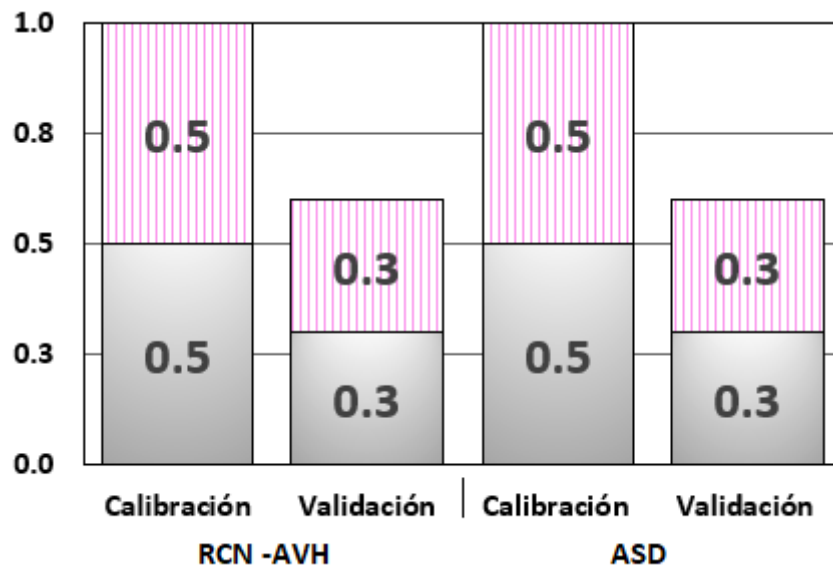


Ilustración 18: Función Objetivo G

Tabla 17: Resultados Generales de Eficiencia del modelo

Escenario	μ Criterios de Eficiencia
<b>ASD</b>	
Calibración	0.781
Validación	0.727
<b>RCN_AVH</b>	
Calibración	0.793
Validación	0.730

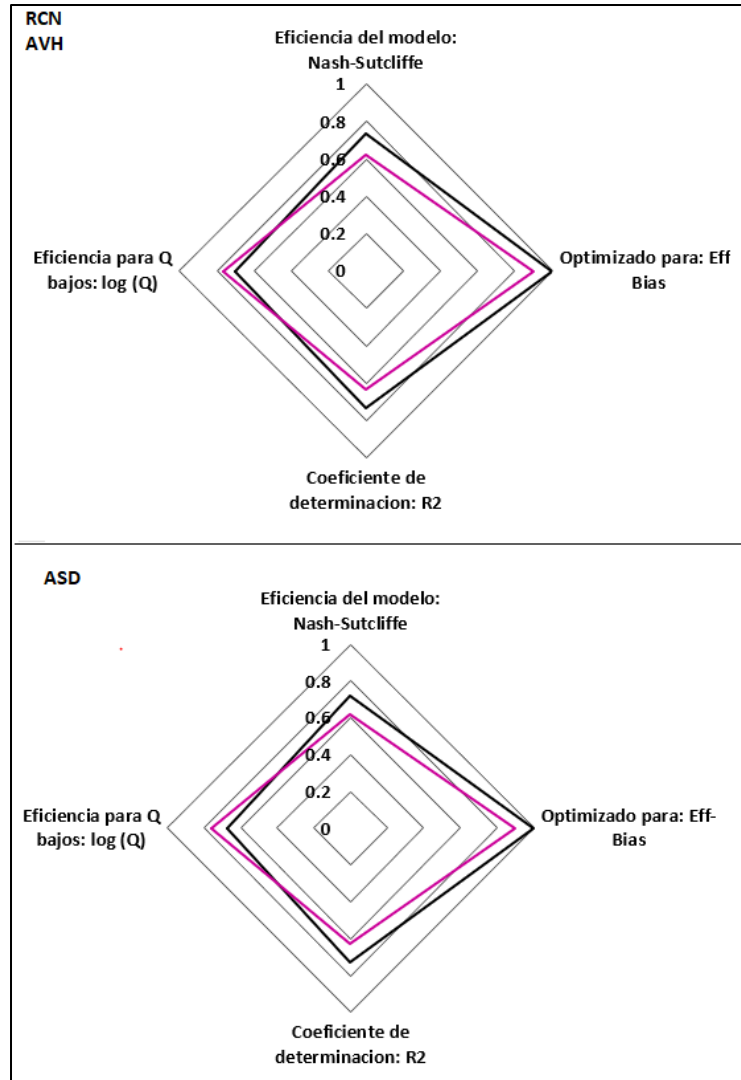


Ilustración 19: Criterios de Eficiencia. La línea negra corresponde a la calibración y la rosada a la validación.

Tabla 18: Criterios de Eficiencia

Criterio	ASD		RCN_AVH	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Eficiencia del modelo: Nash-Sutcliffe	0.720	0.620	0.732	0.619
Optimizado para: Eff-Bias	1.00	0.90	1.00	0.90
Coeficiente de determinacion: R2	0.730	0.630	0.734	0.632
Eficiencia para Q bajos: log (Q)	0.673	0.762	0.704	0.766

Los parámetros óptimos para la microcuenca Quinahuaycu se exponen en la siguiente Tabla:

Tabla 19: Parámetros óptimos

<b>DISCRETIZACIÓN ACTUAL</b>			
<b>Rutina de Suelo RCN-AVH</b>			
	Pajonal	Humedal	VH
FC	250	100	50
LP	0.75	0.6	0.5
BETA	2.65	0.1	0.01
<b>Rutina de Suelo ASD</b>			
	Páramo	VH	SD
FC	198	50	1.25
LP	0.70	0.5	0.9
BETA	1.77	0.01	3
<b>Rutina de respuesta</b>			
PERC		1.85	
ALPHA		0.47	
K1		0.195	
K2		0.183	
<b>Rutina de enrutamiento</b>			
MAXBAS		1.75	

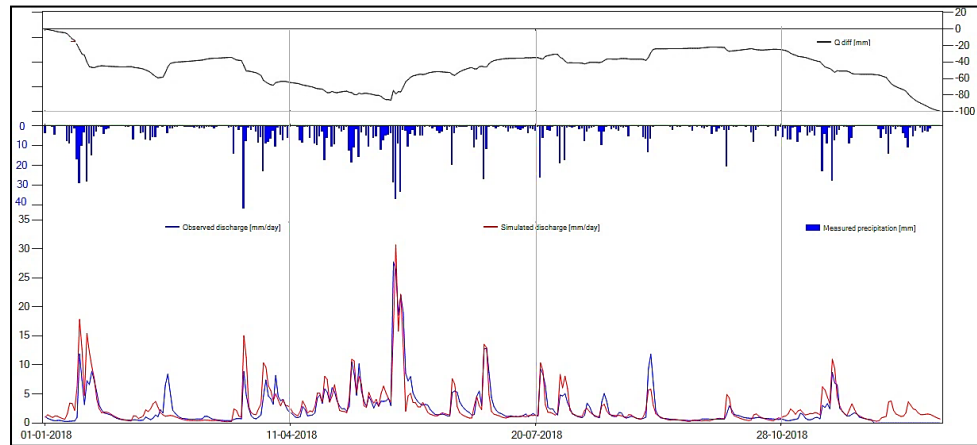
- **Escenarios: RCN-AVH**

En el proceso de calibración, la evaluación de los parámetros dio como resultado un valor de 1 para la función objetivo **G**, un error promedio de -0.39 mm/año correspondiente a un error porcentual del -0.037% y el promedio de los 4 criterios de eficiencia fue de 0.793. En la etapa de Validación, la función objetivo **G** presentó un valor de 0.6, un error promedio de 91.14 mm/año correspondiente a un error del 9.7% y un promedio de los criterios de eficiencia de 0.730.

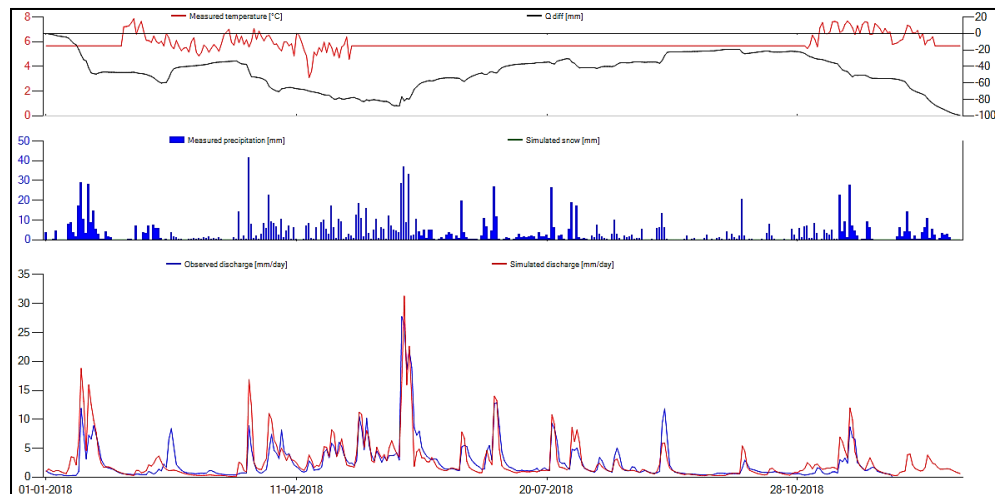
- **Escenarios ASD**

En la calibración se obtuvo: un valor de 1 en **G**, error promedio de 0.27 mm/año, correspondiente a un error del 0.03% y un promedio de criterios de eficiencia de 0.781. En la validación se obtuvo: un valor de 0.6 en **G**, error promedio de 98.23 mm/año, correspondiente a un error del 10.5% y promedio de criterios de eficiencia de 0.727.

Optimizar el modelo para el error medio o sesgo, se tradujo gráficamente como ajustar la serie de datos horizontalmente, con menos interés en ajustarla de forma vertical. Los resultados de la Calibración (Ilustración 20 y 21) muestran que el modelo tiende a sobre estimar los caudales pico (las diferencias entre  $Q_{obs}$  y  $Q_{sim}$  son negativas) y se debe a que la función de Eficiencia del modelo (Nash-Sutcliffe) es sensible a valores extremos.



*Ilustración 20: Resultados HBV Calibración (P-Q) escenarios RCN y AVH*



*Ilustración 21: Resultados HBV Calibración (P-Q) escenarios ASD*

En el proceso de validación los parámetros tienden a subestimar los caudales pico, esto resulta congruente al observar los diagramas de caja de la precipitación (2.4.2.) entre los años 2018 y 2019, en estos se evidencia que, en la segunda mitad del año 2018, los caudales con los cuales se calibraron los parámetros son un 29% más bajos que los caudales observados en el 2019; sin embargo, los parámetros muestran una buena eficiencia para representar los caudales bajos y promedios y por ende para estudiar el balance hidrológico.

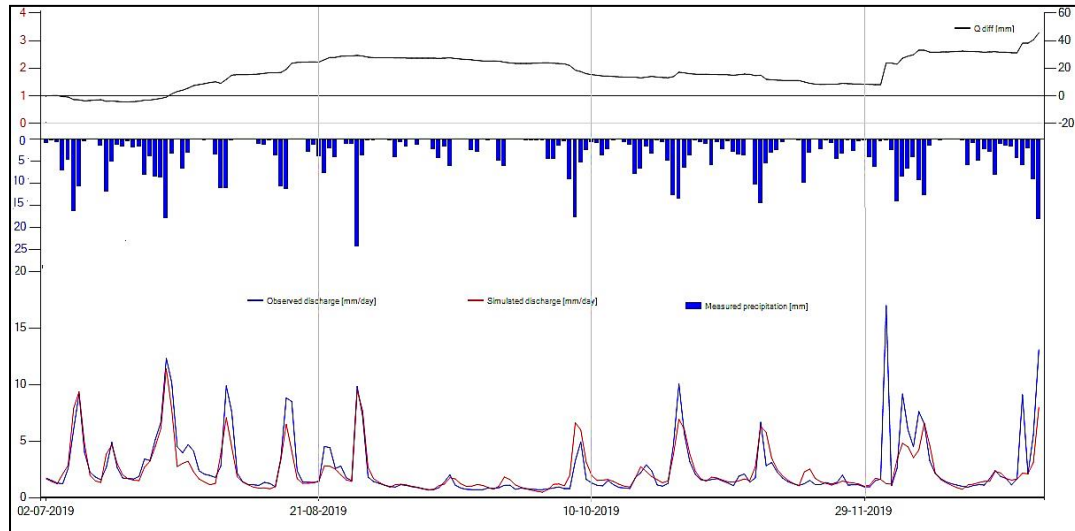


Ilustración 22: Resultados HBV Validación (P-Q) escenarios RCN y AVH

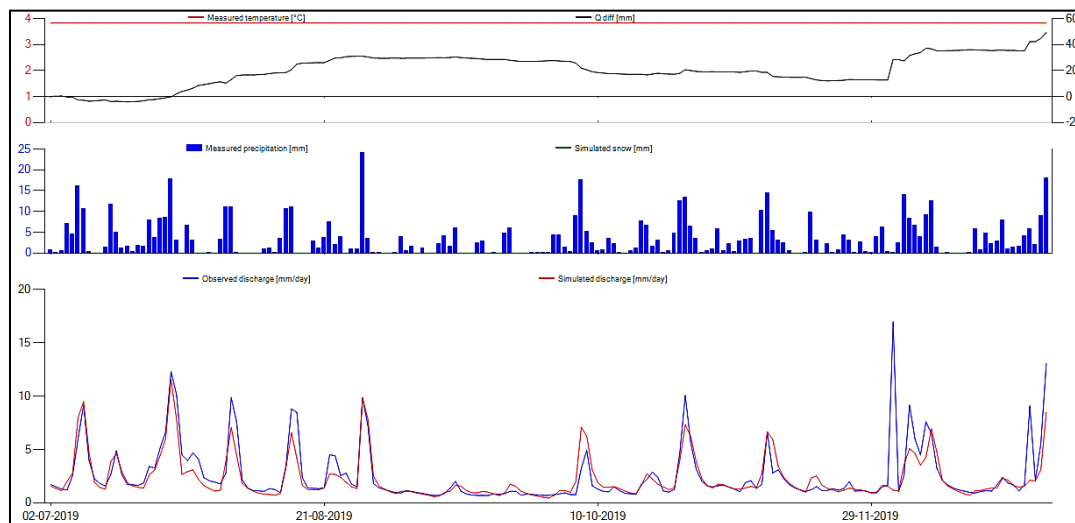


Ilustración 23: Resultados HBV Validación (P-Q) escenarios ASD

La eficiencia para el escenario ASD en el proceso de calibración es el 98.5% de la eficiencia de los escenarios RCN y AVH y 99.6% de la eficiencia en el proceso de validación. Por este motivo, el balance hidrológico actual de la microcuenca, se estudia en base a la calibración para los escenarios RCN y AVH.

## 4.2. Estado Actual

### 4.2.1. Características físicas

- **Morfometría**

La microcuenca Quinahuaycu tiene un área de 491.3 ha, una elevación media de 3750 m s.n.m. y una pendiente media del 21%, por lo tanto, presenta una topografía fuertemente inclinada o relieve escarpado (POMCA, 2014b). Ibáñez et al. (2011) afirman que, el relieve tiene más influencia que la forma en la respuesta hidrológica de la cuenca, a mayor relieve la generación de escorrentía se produce en lapsos de tiempo menores.

Tabla 20: Morfometría

A	491.3	Ha
P	11.2	Km
L	2.5	Km
$W_{\mu}$	2	Km
Elevaciones		
Hmax	3865	m.s.n.m
Hmin	3601	m.s.n.m
$H_{\mu}$	3750	m.s.n.m
Pendiente	°	%
Smax	61	180
Smin	0	0
$S_{\mu}$	12	21
Kc	1.43	
Kf	0.79	

En la Ilustración 24, se presenta el histograma de frecuencias de elevaciones y la Curva Hipsométrica, obtenidas a partir de la tabla de frecuencias de la microcuenca ([Anexo 8.2.2](#)), la curva se asemeja a una curva tipo “A” ([Anexo 8.2.1](#)), por lo tanto, se deduce que la microcuenca está en la etapa de juventud y presenta potencial erosivo.

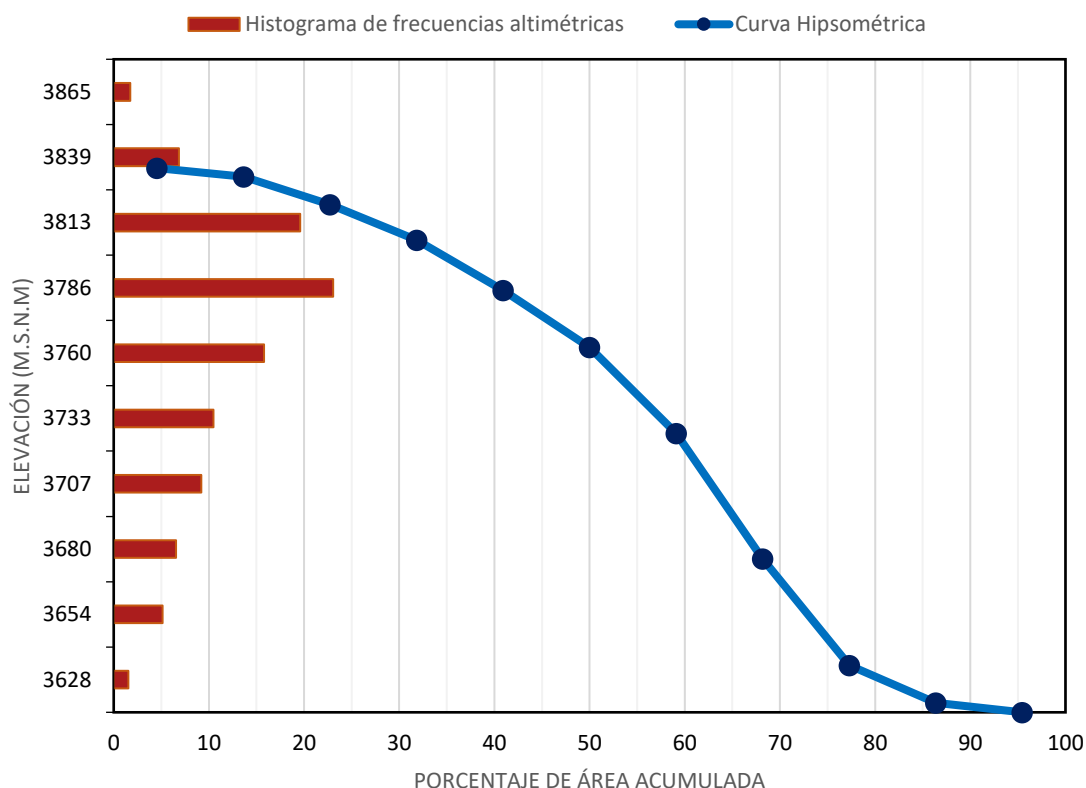


Ilustración 2414: Relieve de Quinahuaycu

La forma incide en el tiempo de concentración de la cuenca, ya que determina la forma del hidrograma de una lluvia, especialmente en los eventos de avenidas máximas, así cuencas de igual área pero diferente forma generan hidrogramas diferentes (Gutiérrez, 2014).

El parámetro de compacidad de 1.43, según (POMCA, 2014a) denota una cuenca medianamente irregular, con forma oval-oblonga (Rango de 1.25 a 1.5); con una capacidad mediana de almacenamiento de agua. Esto tiene sentido al pensar que la microcuenca Quinahuaycu tiene una topografía inclinada, por ende, es en donde están naciendo los afluentes del río Irquis, por el contrario, las partes más planas de los páramos es en donde se concentran las lagunas. El factor de forma de 0.79 indica que la microcuenca es ancha,



este tipo de forma benefician una alta producción de caudales, pero de la misma forma el potencial de crecientes es alto (POMCA, 2014a).

- **Red hídrica**

La microcuenca Quinahuaycu presenta una red hídrica de orden 3, cuyo río principal tiene una longitud de 2.41 km. Muestra una densidad moderada de drenaje ( $>1$ ), con una distancia media de escurrimiento de la lluvia de 0.127 km. La red hídrica no es sinuosa y se puede considerar su cauce principal como un río medianamente recto, con una pendiente inclinada del 7.5%. Por último, en el [anexo 8.1](#), se presenta el mapa de la red hídrica de la microcuenca Quinahuaycu.

Tabla 21: Red hídrica

Lcp	2.41	Km
Dd	1.969	km/km <sup>2</sup>
I	0.127	Km
Sd	1.10	No
J $\mu$ 1	7.51	%
J $\mu$ 2	7.47	%

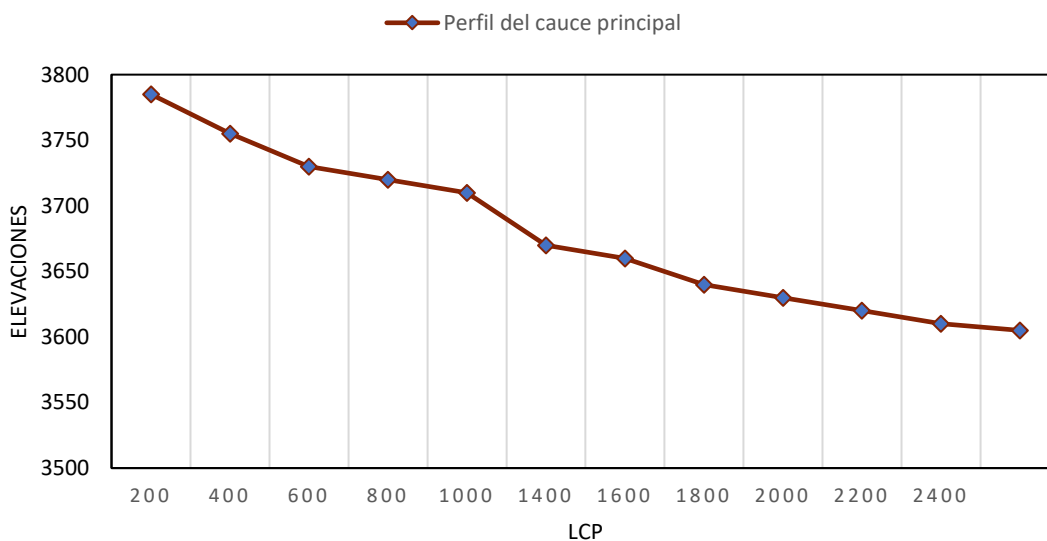


Ilustración 2515: Perfil de Lcp

- **Uso de suelo y cobertura vegetal**

En el año 2014, Crespo P. et al., describieron a la microcuenca Quinahuaycu como una zona con baja intervención antropogénica, con pastoreo extensivo de baja intensidad animal, fue considerada como una microcuenca natural para ser testigo en el estudio “*Impactos del cambio de uso de la tierra en la hidrología de los páramos*”. Sin embargo, esta zona se encuentra dentro del área nacional de recreación Quimsacocha, la cual es una zona de influencia de posibles intervenciones mineras a futuro. A corto plazo, la principal forma de alteración a esta zona sigue siendo el pastoreo, esto se ve reflejado en el mapa de cobertura vegetal del [anexo 8.1.1](#), en donde existe un 21% de vegetación herbácea.

Tabla 22: Análisis de datos shape de cobertura vegetal

Cobertura Vegetal	Área [ha]	%
Pajonal	239	49
Humedal	125	26
Vegetación Herbácea	104	21
Vegetación Arbustiva	15	3
Suelo Desnudo	3	1
Área levantada	486	Ha
Área Real	491	Ha
Diferencia	5	Ha
Error	1	%

En la Tabla 23 se expone el porcentaje de las 3 principales zonas de vegetación para 3 zonas de elevación.

Tabla 23: Discretización para 3 escenarios

RCN -AVH			
Elevación	Pajonales	Humedales	Vegetación Herbácea
ZONA 1	0.212	0.064	0.103
ZONA 2	0.249	0.140	0.076
ZONA 3	0.048	0.064	0.044
<b>SUMA</b>	<b>0.508</b>	<b>0.268</b>	<b>0.224</b>
ASD			
Elevación	Páramo	Vegetación Herbácea	SD
ZONA 1	0.276	0.103	0.000
ZONA 2	0.389	0.076	0.000
ZONA 3	0.111	0.044	0.000
<b>SUMA</b>	<b>0.776</b>	<b>0.224</b>	<b>0.000</b>

La microcuenca de Quinahuaycu es una microcuenca de pajonal, este corresponde al 50% de su cobertura, seguido por un 25% de humedales, resultando en un 75% de cobertura natural de páramo.

#### 4.2.2. Características hidrometeorológicas

##### • Hietograma-Hidrograma

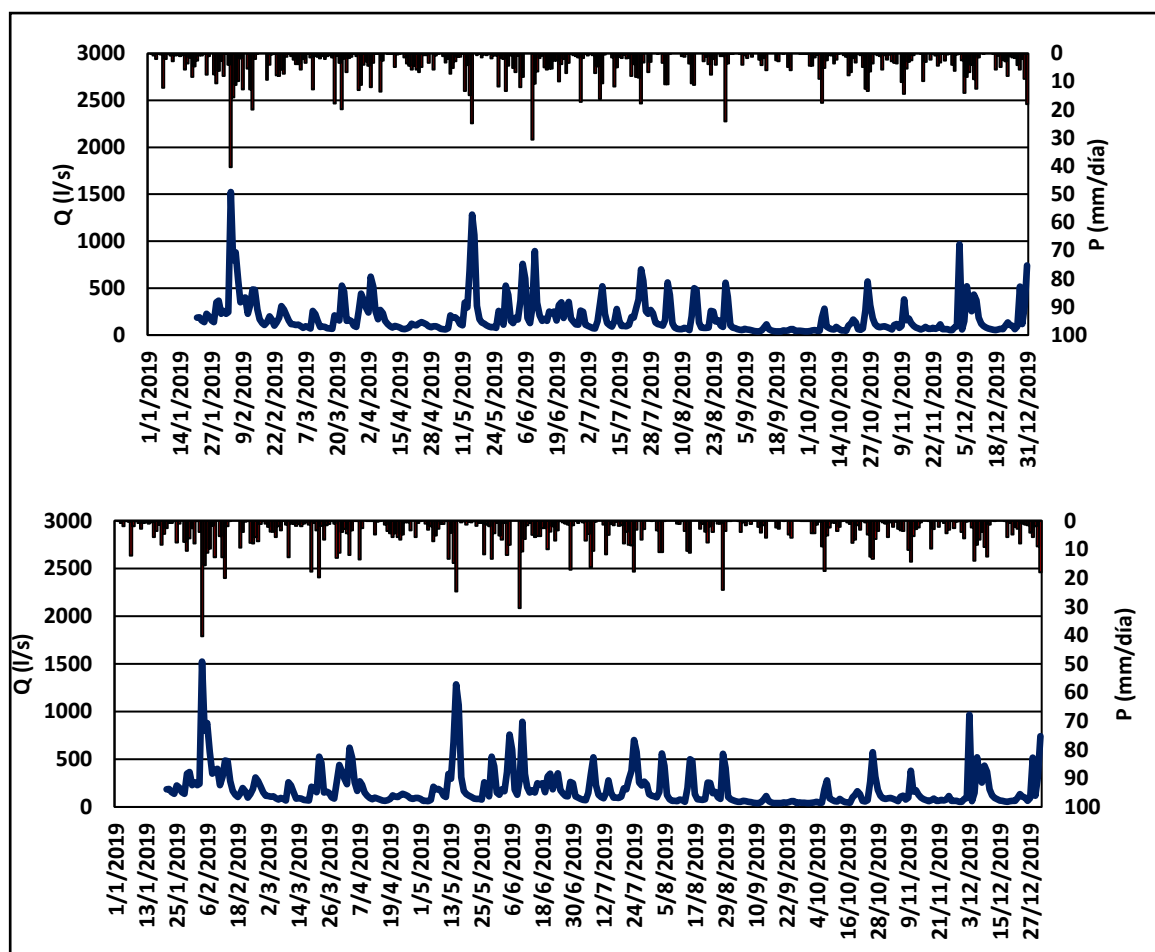


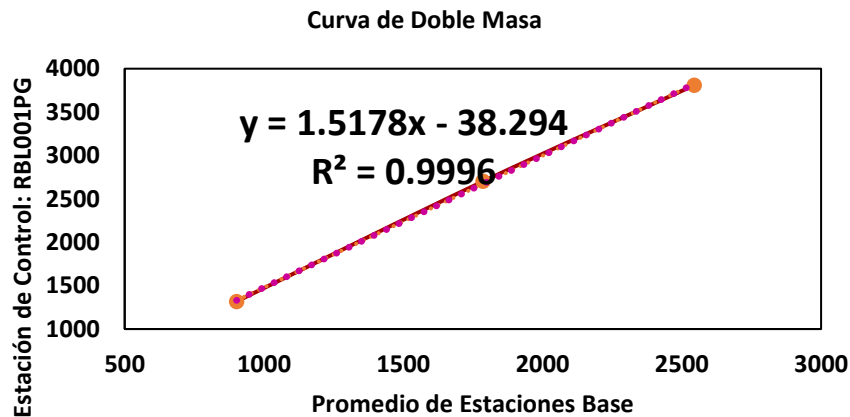
Ilustración 166: Gráficos Anuales 2018 superior y 2019 inferior

En función de un análisis visual de la Ilustración 26, se puede afirmar que, existe una relación directa entre los gráficos anuales del hietograma de precipitación y el hidrograma de caudal. Esta relación es notable sobre todo en los picos de precipitación y caudal, así la precipitación y caudal pico del año 2018, se grafica en el mes de mayo, mientras que, en el año 2019, se encuentra en el mes de febrero.

Cuando la intensidad de precipitación sobre la cuenca es constante, el hidrograma de un evento presenta un punto en el cual el caudal de salida es constante y el tiempo en el que se llega a este punto se llama tiempo de equilibrio o de concentración. Se puede observar que, los hidrogramas anuales no presentan zonas con caudales constantes, esto se debe a que las lluvias en los ecosistemas de páramo son frecuentes y se traslapan entre sí provocando un efecto de superposición. Por esta razón, no se puede asumir una intensidad constante y en consecuencia no se puede aplicar métodos tradicionales para separar caudales. Además, las características de morfología, uso de suelo, cobertura vegetal y la red hídrica también afecta la forma de los hidrogramas, complicando aún más la separación de flujos. Es por esto que el análisis de hidrogramas, para estudiar el Balance Hidrológico de la microcuenca, fue realizado mediante el modelo HBV-light.

- **Precipitación diaria (mm)**

Los resultados de los registros de precipitación se obtuvieron de los años 2018 y 2019 de la estación RBL\_001\_PG; la estación pluviométrica en la zona alta de Quinahuaycu fue descartada considerando que, en el año 2018 no se realizó monitoreo y el año 2019 cuenta sólo con un 13% del total de datos diarios. Para estudiar la consistencia en los registros de la estación RBL\_001\_PG se compararon estos con el promedio de las estaciones cercanas IAM\_003\_PG, IAM\_004\_PG y VLR\_004\_PG, la curva de doble masa correspondiente se muestra en la siguiente Ilustración.



*Ilustración 27: Curva de doble masa*

Los datos se ajustan con un coeficiente de determinación de 0.9996, para los años de registro de precipitación del 2018, 2019 y 2020, por lo tanto, los datos tienen consistencia para el periodo de estudio.

La Tabla 24 muestra los resultados del análisis estadístico de la precipitación:

Tabla 24: Estadística de Datos RBL001PG

Mes	2018				2019			
	M	$\Sigma$	CV	Pmensual	$\mu$	$\Sigma$	CV	Pmensual
Ene	5.1	7.6	1.5	157.0	2.8	3.3	1.2	88.2
Feb	1.7	2.5	1.5	48.0	6.7	8.4	1.3	188.4
Mar	3.8	8.4	2.2	118.4	4.2	5.1	1.2	128.8
Abr	5.0	4.4	0.9	149.6	3.1	3.4	1.1	93.2
May	8.4	9.3	1.1	259.0	3.9	5.7	1.4	122.0
Jun	3.9	6.0	1.5	117.4	5.3	6.2	1.2	158.2
Jul	2.8	5.5	1.9	87.2	4.0	4.8	1.2	125.0
Ago	2.1	3.5	1.7	65.8	3.4	5.2	1.5	105.0
Sep	1.5	2.9	1.9	45.4	1.3	1.9	1.5	38.4
Oct	2.1	4.0	1.9	65.6	3.8	4.3	1.1	116.8
Nov	4.3	6.4	1.5	130.4	2.9	3.4	1.2	86.0
Dic	2.4	3.3	1.4	73.6	4.3	4.6	1.1	133.2
<b>Total</b>								
<b>Anual</b>	<b>3.6</b>	<b>6.1</b>	<b>1.7</b>	<b>1317.4</b>	<b>3.8</b>	<b>5.1</b>	<b>1.3</b>	<b>1383.2</b>

La precipitación diaria acumulada, del año 2018 fue de 1317.4 mm y del año 2019 de 1383.2 mm y la precipitación media 3.6 y 3.3 mm respectivamente; no obstante, el coeficiente de Variación de Pearson es mayor a 1 en todos los meses del año, con excepción de abril del 2018. El valor de CV total para los años 2018 y 2019 es 1.5; obtener valores de CV mayores a 1 se interpreta como la existencia de una dispersión muy alta en los datos de estudio, en consecuencia, las medias poblacionales no son medidas confiables.

Esto coincide con el comportamiento típico de variabilidad climática en ecosistemas de páramo, descritos en varios estudios, entre ellos (Sucuzhañay & Céleri, 2018) afirman que, las regiones montañosas de los Andes tienen una gran variabilidad espacio-temporal de la lluvia, motivo que causa incertidumbre en los modelos hidrológicos que se apliquen en ellos.

Para estudiar la distribución de las series temporales, tomando en cuenta la dispersión en los datos, se obtuvieron los diagramas de caja de la Ilustración 28.

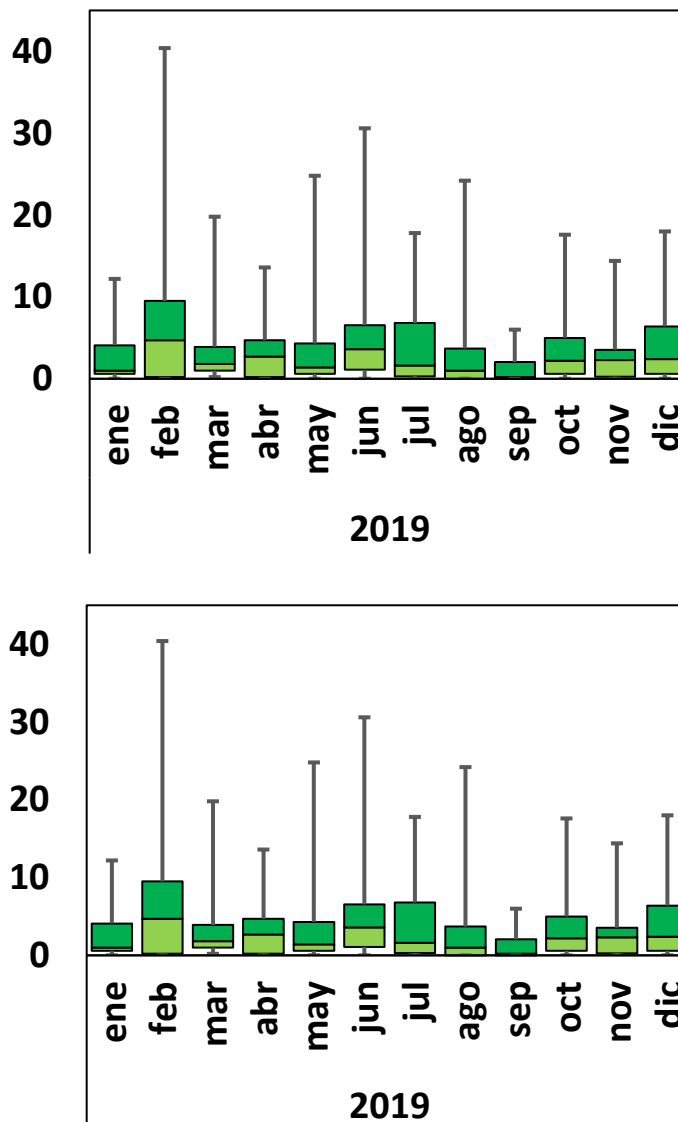


Ilustración 28: Diagrama de Caja de Precipitación RBL001PG

El mes más lluvioso del año 2018 fue mayo, con un total de 259 mm de precipitación diaria acumulada. El 50% de las precipitaciones diarias en mayo han sido hasta 6 mm, además, este mes tiene el cuartil 3 más alto, mostrando un 75% de las precipitaciones diarias hasta 11 mm. En contraste, en todo el año el 50% de las precipitaciones diarias han sido hasta 1.2 milímetros y el 75% hasta 4.8 milímetros. El evento de precipitación máxima diaria fue registrado a finales de marzo, con un valor de 41.6 milímetros, este mes tiene la mayor variación entre el valor máximo y el cuartil 3 correspondiente a 2 mm.

El mes más lluvioso del año 2019 corresponde a febrero, con un total de 188.4 mm, el 50% de las precipitaciones diarias han sido hasta 4.7 mm y el 75% hasta 9.5 mm. En

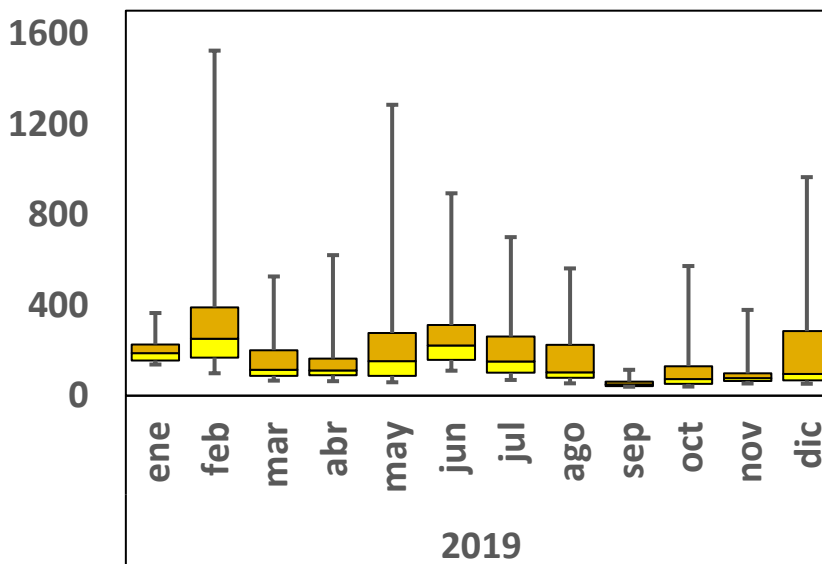
comparación, en todo el año 2019, el 50% de las precipitaciones diarias han sido registradas hasta 1.8 milímetros y el 75% hasta 5.4 milímetros. El evento de precipitación máxima diaria también fue registrado en febrero, a inicios de mes, con un valor de 40.4 milímetros.

- **Caudal diario (l/s)**

Para el año 2018, el trimestre que registró los caudales más elevados, corresponde a los meses de abril, mayo y junio; por otro lado, se identificaron los meses de marzo, septiembre y octubre como los periodos de estiaje del río Irquis. La avenida del río para este año, fue registrado en mayo con un valor de 1578 l/s. Por otra parte, para el año 2019 la tendencia de un trimestre con caudales elevados, pertenece a los meses de mayo, junio y julio; sin embargo, los meses de febrero y diciembre también presentaron caudales elevados. Los meses de estiaje del río ocurrieron en septiembre y noviembre y el mes de febrero registró la crecida de 1524 l/s.

En vista de que, en el mes de mayo ocurrieron los caudales pico del hidrograma del 2018, el diagrama de caja de este mes presenta los valores más altos de cuartiles. El valor mínimo presentó un caudal de 117 l/s, en comparación, el promedio de los 11 meses restantes fue 35 l/s. De igual forma, el Q1 fue de 167 l/s, frente a una media de 49 l/s; el Q2 fue de 242 l/s, frente a 79 l/s; el Q3 483 l/s frente a 125 l/s y el valor máximo fue 1568 l/s mientras la media fue 460 l/s.

Algo semejante sucede en el año 2019, para el mes de febrero. En este mes la mayor diferencia ocurre entre el valor máximo del diagrama de caja de 1524 l/s y el promedio de los valores máximos de los 11 meses restantes, correspondientes a 657 l/s.



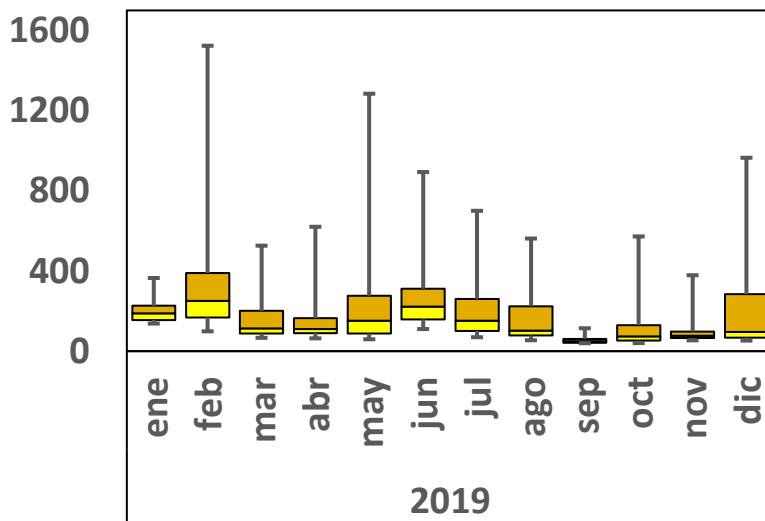


Ilustración 29: Diagrama de Caja de Caudal IAM003HG

- **Evapotranspiración (mm/día)**

El trimestre con menor evapotranspiración potencial, corresponde a los meses de junio, julio y agosto. Como se puede ver en la Ilustración 30, este trimestre se ubica en la mitad del año. Hacia este llega la rama descendente del primer semestre, en el cual el mes de febrero presenta los mayores valores de cuartiles, con un valor máximo de 2.3 mm/día; sin embargo, el mes de mayo presenta un valor pico de 2.6 mm/día. En la rama ascendente, correspondiente a la segunda mitad del año, el mes de mayo presenta los mayores valores de cuartiles y el valor máximo de este mes, es el mismo valor de ETo pico de todo el segundo semestre, con un valor de 3 mm/día. El valor mínimo calculado de ETo, en el año hidrológico completo, fue 0.8 mm/día y se dio en el mes de julio.

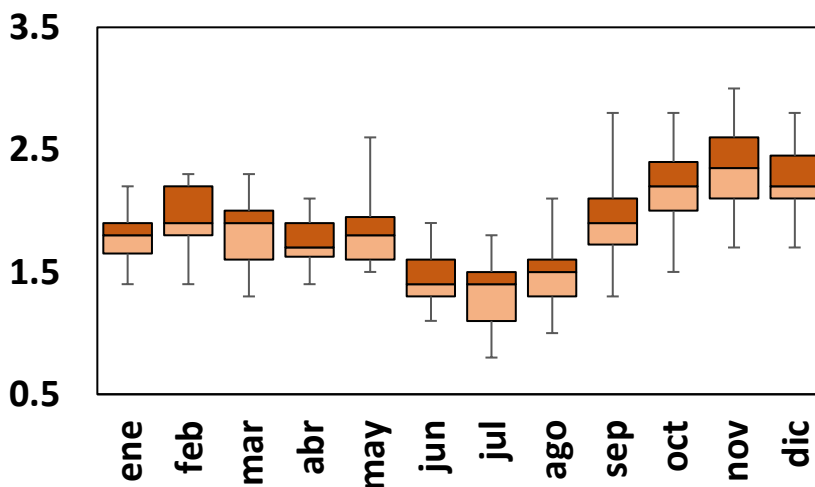


Ilustración 30: Diagrama de Caja de ETo IAM001M



### 4.2.3. Balance Hidrológico

El modelo devuelve un resumen anual promedio del periodo de calibración, enero 2018 - julio 2019 (mm/año), de la precipitación, la evapotranspiración real o de cultivo, el escurrimiento y sus componentes de flujo base y escorrentía directa. Para obtener el promedio anual de almacenamiento de agua en el páramo, se calculó el promedio mensual de almacenamiento en la caja de suelo de los resultados de paso diario del modelo.

Los flujos y el almacenamiento de agua se estudiaron en unidades de mm/año, m<sup>3</sup>/año y l/s.

El balance hidrológico mensual se muestra en la Tabla 25 y los resultados para un año hidrológico se muestra en la Tabla 26. Se puede diferenciar con facilidad la estación lluviosa (enero a junio) de la estación seca (julio a diciembre), estos resultados confirman los hallados en las características hidrometeorológicas de la microcuenca Quinahuaycu (4.2.2.). A continuación, se resumen los principales resultados del balance hídrico:

- La ETc promedio anual para la vegetación es un 60% de ETo.
- La escorrentía total del río, en el punto de salida de la cuenca, es de 1041 mm/año; el 55% corresponde a la escorrentía directa, producida por la precipitación y el 45% corresponde al flujo base del río, debido al flujo subsuperficial.
- La microcuenca tiene una capacidad de almacenamiento promedio de agua de 102 mm anuales.

Tabla 25: Balance promedio mensual

Mes	P mensual	Qs Corregido	FB Corregido	Q Corregida	Q Simulada	ETc mensual	Almacenamiento Promedio	Cambio en Almacenamiento
Ene	252.0	70.4	49.4	119.8	172.7	71.4	100.6	60.8
Feb	243.2	126.6	87.2	213.8	181.0	68.6	106.9	-39.2
mar	254.0	72.3	60.3	132.7	157.0	65.5	99.3	55.9
Abr	249.7	97.1	92.1	189.2	193.6	65.7	108.1	-5.1
May	391.8	246.4	129.0	375.4	305.0	71.2	111.4	-54.7
Jun	283.2	141.0	107.3	248.3	217.1	56.6	115.9	-21.7
Jul	89.7	40.7	45.5	86.2	76.3	26.0	114.2	-22.5
Ago	67.6	18.7	38.6	57.3	58.1	28.7	110.6	-18.4
Sep	46.7	20.9	25.8	46.7	32.0	32.7	96.4	-32.7
Oct	67.5	7.1	22.1	29.2	34.6	33.0	82.8	5.4
Nov	134.1	28.0	31.6	59.6	87.1	39.1	90.4	35.4
Dic	75.7	0.0	2.6	2.6	46.6	36.4	87.8	36.7

Los valores de los componentes del flujo de la Tabla 25, se corrigieron repartiendo el error mensual ( $Q_{observado} - Q_{simulado}$ ) según el porcentaje anual de cada flujo:  $Q_s Corregido = Q_s sim + 0.55(Q_{obs} - Q_{sim})$  y  $F_b Corregido = F_b sim + 0.45(Q_{obs} - Q_{sim})$ . En el mes de diciembre la escorrentía directa

resultó un valor negativo ( $-Q_s^*$ ), esto representa el estiaje del río y una recarga del acuífero, por lo tanto, para corregir los componentes simulados por el modelo en ese mes se usaron las siguientes relaciones:  $Q_s \text{ Corregido} = 0$  y  $F_b \text{ Corregido} = F_b \text{ sim} + 1 * (Q_{obs} - Q_{sim})_{diciembre} - Q_s^*$ . Se evidencia una buena eficiencia de los resultados comprobando  $\Delta S \rightarrow 0$ , con -0.2.

Tabla 26: Balance promedio anual

Unidad	P	ETc	ETo	Volumen de escurrimiento $\mu$	Qs	FB	Almacenamiento $\mu$
mm/año	1398.9	396.8	661.9	1041.4	572.2	469.2	102.00
m3/año	6872685	1949475	3251773	5116517	2811327	2305190	501126
l/s	217.9	61.8	103.1	162.2	89.1	73.1	15.9
		% ETc/ETo=	60	%	55	45	

Las Ilustraciones siguientes muestran los resultados del modelo de la separación de flujos; del almacenamiento de agua, debido a la humedad y la interceptación de la vegetación y de la demanda de agua por parte de la vegetación ETc (rojo), se puede comprobar que la vegetación de estos ecosistemas requiere menos agua que la vegetación de referencia (FAO Penman-Monteith).

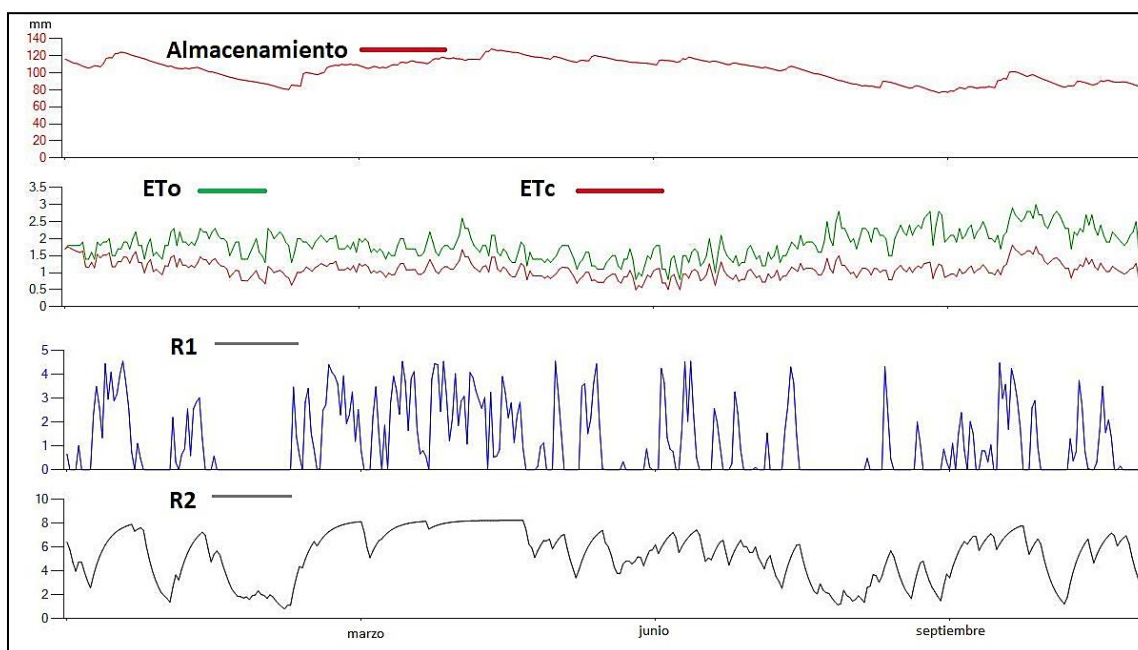


Ilustración 31: Resultados gráficos HBV-light

Con el volumen anual de escurrimiento en la salida de la cuenca, se podrían llenar 1516 piscinas olímpicas. El caudal del río está conformado en un 45% por el flujo base, debido al flujo sub superficial, esto demuestra el papel importante del páramo como un reservorio natural de agua y un regulador al proveerla en las épocas de sequía, en concreto, el suelo de la microcuenca Quinahuaycu, tiene una capacidad promedio de almacenamiento de agua equivalente a llenar 148.5 piscinas olímpicas. Por último, con un 77.6% de territorio de páramo y un 22.4% de vegetación herbácea, la demanda de agua promedio de la vegetación es un 60% de la evapotranspiración de referencia.

#### 4.3. Prueba de hipótesis de cambio de vegetación

Los resultados prueban las premisas iniciales, las cuales afirman que el territorio de páramo aumenta la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, disminuyendo la escorrentía directa y aplanando los picos de caudales.

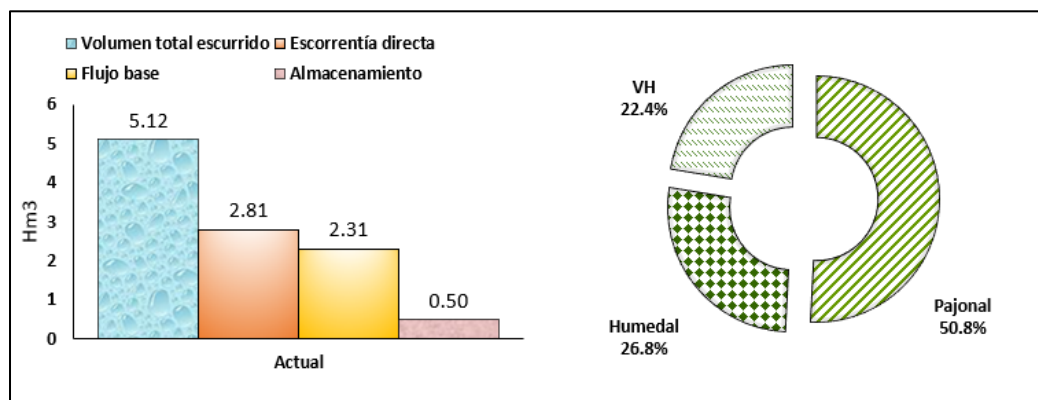


Ilustración 32: Estado Actual

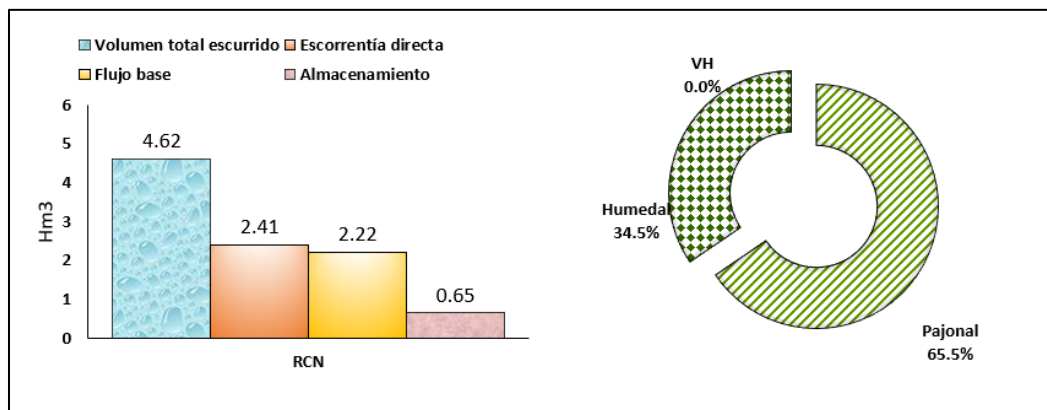


Ilustración 1733: Escenario RCN

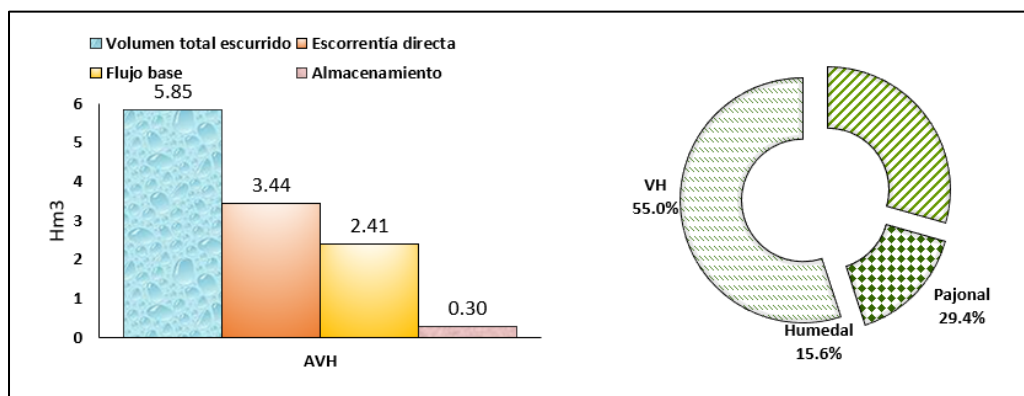


Ilustración 34: Escenario AVH

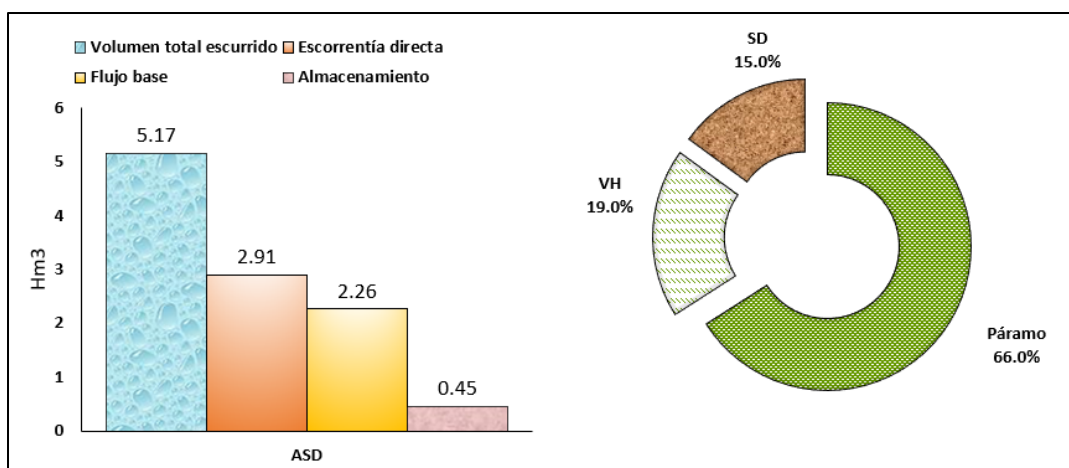


Ilustración 35: Escenario ASD

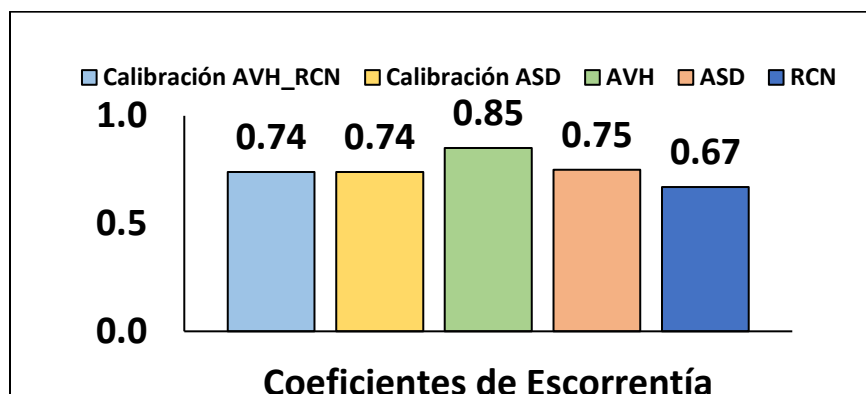


Ilustración 36: Índice hidrológico: Coeficiente de escorrentía

- **Escenario RCN**

A medida que aumenta el porcentaje de páramo, la escorrentía directa disminuye mientras el almacenamiento de agua en el suelo y ETo aumentan. Esto demuestra que la vegetación de pajonal influye en la intercepción de lluvia y humedad y ayuda al agua a infiltrarse en el suelo, mientras que el aumento de ETo coincide con estudios que muestran que, a medida que aumenta la vegetación de humedales la ETo aumenta por la gran concentración de agua en este tipo de vegetación.

Comparando el estado actual con una recuperación del 100% del territorio de páramo, la escorrentía directa disminuye en 0.4 Hm<sup>3</sup>, equivalente a un 14%. El flujo base se mantiene más o menos constante, variando de 2.31 Hm<sup>3</sup> a 2.22 Hm<sup>3</sup> anuales, se puede observar en la Ilustración 37 que la tasa del flujo base incrementa debido a la disminución de la escorrentía superficial. Por último, el almacenamiento en el suelo incrementa de 0.15 Hm<sup>3</sup> a 0.65 Hm<sup>3</sup>, equivalente a un incremento total del 30% de almacenamiento anual de agua.

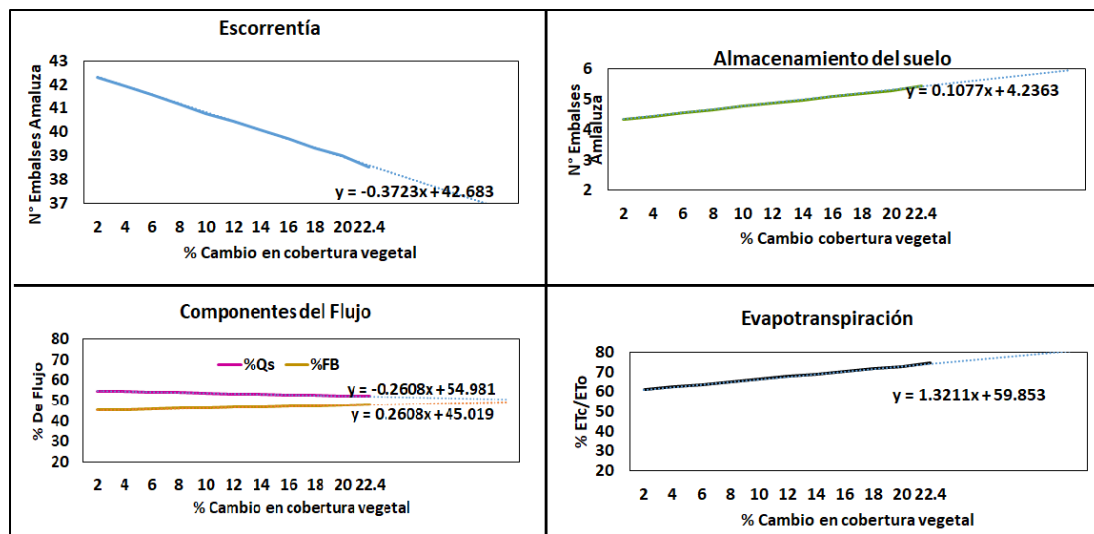


Ilustración 37: Tasa de cambio del escenario RCN

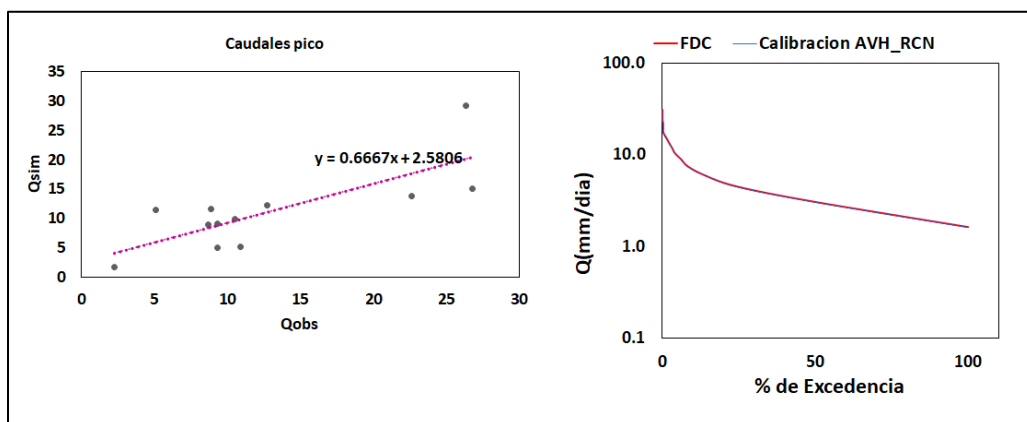


Ilustración 38: Variación de caudales pico y FDC del escenario RCN

### • Escenario AVHp

Se puede comprobar que, el pastoreo intensivo afecta la regulación hidrológica de forma crítica, aumentando la escorrentía superficial, disminuyendo el almacenamiento en el suelo, aumentando el coeficiente de escorrentía de 0.74 a 0.85. La disminución de la evapotranspiración, se relaciona con la disminución de páramo (principalmente humedales) y se puede observar en la Ilustración 40 un aumento en la tasa de los caudales pico y un desplazamiento vertical positivo de la curva de duración de caudales.

Comparando el estado actual con la simulación de un incremento de 32.6% de vegetación herbácea, dando como resultado que el 55% del total de la cobertura de Quinahuaycu corresponda a vegetación herbácea, se pudo cuantificar un incremento de 0.63 Hm<sup>3</sup> en la escorrentía superficial, equivalente a un incremento del 22%. El flujo base

presenta un aumento del 4% y se puede observar que la tasa del flujo base tiende a decrecer influenciada por el incremento de la tasa de la escorrentía superficial. El almacenamiento del suelo registra una pérdida de 0.2 Hm<sup>3</sup>, equivalente a una pérdida del 60% de almacenamiento de agua.

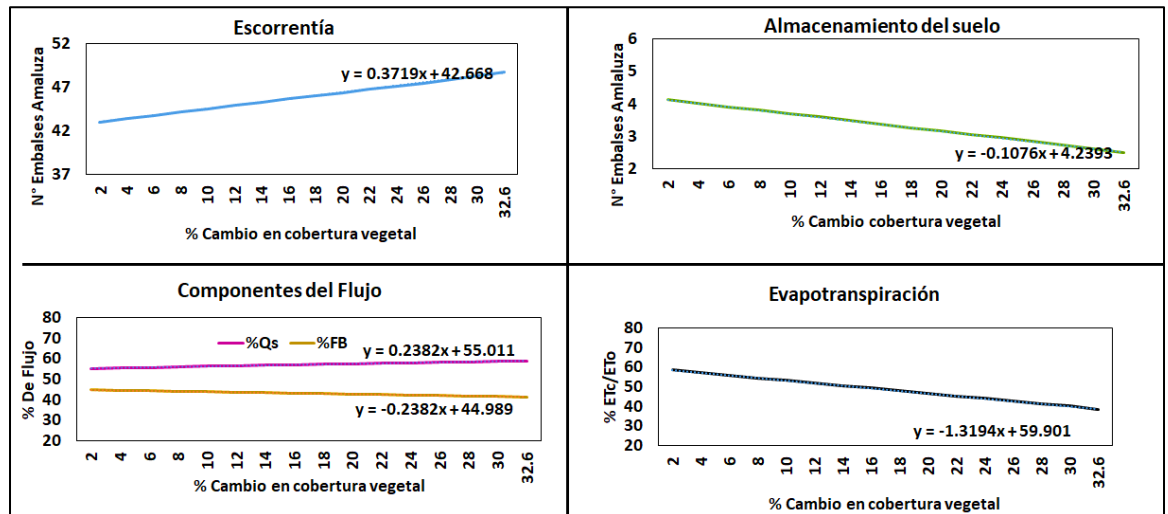


Ilustración 39: Tasa de cambio del escenario AVHp

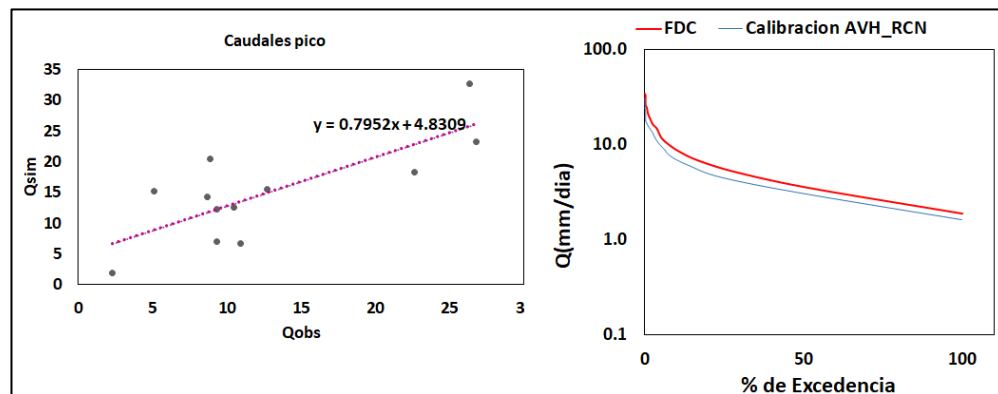


Ilustración 40: Variación de caudales pico y FDC del escenario AVHp

### • Escenario ASD

Comparando el estado actual con una simulación en la cual el suelo desnudo ocupe un 15% del porcentaje total de cobertura de Quinahuyacu, se pudo cuantificar un aumento de la escorrentía superficial de 0.09 Hm<sup>3</sup>, equivalente a un 3%; el flujo base disminuye en 0.04 Hm<sup>3</sup>, equivalente a un 1.7% y el almacenamiento en el suelo disminuyó en 0.08 Hm<sup>3</sup>, equivalente a un 15%.

De igual forma que el escenario AVHp, el escenario ASD presenta una disminución en la tasa del caudal base, sin embargo, a diferencia del escenario AVHp, esta disminución no está provocada por un incremento considerable en la escorrentía directa, más bien el flujo base tiende a decrecer por un efecto de evaporación directa del suelo. Este efecto también se puede comprobar observando que los caudales pico son inferiores a los caudales picos del estado actual.

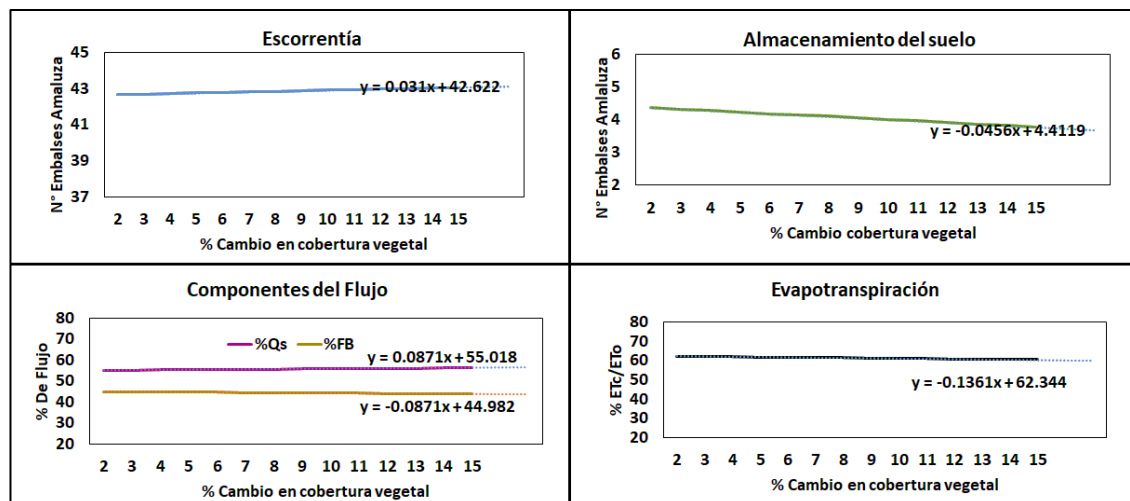


Ilustración 41: Tasa de cambio del escenario AVHp

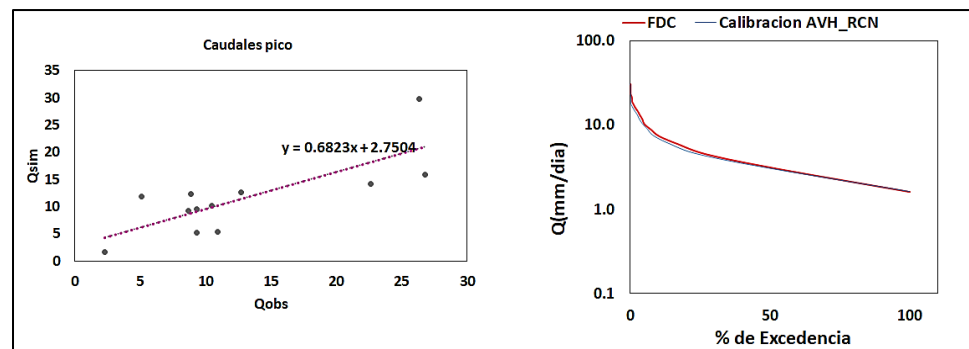


Ilustración 42: Variación de caudales pico y FDC del escenario ASD



#### 4.4. Gestión social del agua

Como (Ochoa, 2021) afirma, las personas que viven en las ciudades dependen de forma directa de las personas que realizan acciones en la parte alta de los ecosistemas andinos. Sin embargo, las políticas de las ciudades muchas veces excluyen a estas comunidades. Es importante plantear proyectos de aprovechamiento sostenible del agua, en el cual el criterio técnico haya sido aplicado de forma que maximice los beneficios tanto para las personas que habitan los ecosistemas, como las poblaciones aguas abajo. Es sustancial recordar que, la gestión de páramos involucra una compleja componente social, que muchas veces es olvidada y difícil de cuantificar.

El manejo integral de los recursos hídricos, en las comunidades andinas, es importante para garantizar un aprovechamiento sostenible del agua. Como ejemplo, si se “sembrara” tan solo el 10% del agua de escorrentía directa en Quinahuaycu (caudal de la lluvia efectiva, sin tener en cuenta el flujo base), se podría dotar anualmente a 100 mil personas (2738 litros anuales per cápita OMS).

Sin lugar a dudas la conservación de la vegetación natural del páramo es la mejor alternativa y es una solución efectiva frente a la dotación de agua para consumo, riego y generación de energía hidroeléctrica para enfrentar la amenaza del cambio climático (Apaza et al., 2006; Ochoa, 2021). Sin embargo, aproximadamente el 70% de los páramos de Ecuador presentan alteraciones por cambio de uso de suelo (Isch, 2012), en este contexto, la recuperación de suelo de páramo no se puede realizar sin un plan integral, en el que no se perjudique a las personas que habitan estas zonas y obtienen recursos de ellas. Una solución a corto plazo para zonas alteradas por pastoreo y cultivo puede ser estudiar técnicas de rotación de ganado y proyectos de agricultura sostenible.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas montañosos funcionan con dos mecanismos popularmente asociados con los términos "*fábrica de agua*" y "*esponja*" (Ochoa, 2021). El primero, desde el punto de vista hidrológico, representa el rendimiento hídrico del páramo, medido como la cantidad de lluvia que se convierte efectivamente en el caudal del río y que está disponible para su aprovechamiento. El segundo es el almacenamiento de agua en el suelo de páramo, responsable de la existencia de agua en los ríos en los periodos secos. Se puede afirmar que, la interacción entre la fábrica y la esponja, determina el mecanismo de la regulación hídrica del páramo.

La microcuenca Quinahuaycu es una zona de nacientes hidrográficos que originan el río Irquis, su topografía pronunciada provoca una capacidad mediana de almacenamiento de agua, con un valor anual promedio de almacenamiento del suelo de 0.5 Hm<sup>3</sup> equivalente a llenar 148.5 piscinas olímpicas (50\*25\*2.7 m); su forma ancha (Oval-Oblonga) beneficia una alta producción de caudales con potencial de crecientes y presenta un valor promedio anual de escorrentía superficial de 2.81 Hm<sup>3</sup>, equivalente a llenar 832.6 piscinas olímpicas, con un coeficiente de escorrentía de 0.74. El escurrimiento promedio anual es de 5.12 Hm<sup>3</sup>, de los cuales 2.81 corresponden al flujo base, demostrando de esta forma la importancia del componente sub superficial en los ecosistemas de páramo de alta montaña con suelos poco profundos.

Las simulaciones estudiadas han demostrado el rol fundamental que juega la cobertura natural del páramo en la regulación hidrológica, (iMHEA, 2020) mencionan que hacen falta estudios en los que se tome en cuenta la interceptación de agua por parte de los pajonales y el aumento de la ETo por parte de los humedales y su relación en la regulación hidrológica, el presente estudio es un aporte que confirma estas hipótesis.

El flujo base en los escenarios RCN y AVHp no presenta variaciones considerables, el incremento o disminución de su tasa anual está influenciado de forma directa por la variación del rendimiento hídrico. Esto tiene coherencia al pensar que las recesiones del flujo base en zonas de recarga hídrica con topografía accidentada son rápidas y por ende el almacenamiento de agua en estas zonas no es alto porque no hay percolación. Sin embargo, en estos escenarios es notable como el rendimiento hídrico afecta de forma directa al almacenamiento de agua en el suelo. En el escenario AVHp se registró un incremento total de 22% en la escorrentía directa y una disminución del 60% de almacenamiento de agua en el suelo, mientras en el escenario RCN, se registró una disminución del 14% en la escorrentía directa y un aumento del 30% en el almacenamiento de agua en el suelo. Esto

demuestra la importancia de la vegetación de páramo en la intercepción de la lluvia y el rol que juega en la retención del agua en el suelo.

En el escenario ASD, se puede comprobar que el flujo base presenta una tendencia a disminuir, los caudales pico son inferiores al estado actual y el almacenamiento en el suelo disminuyó en un 15%. Esto se puede relacionar con un proceso de evaporación directa del suelo y comprueba la hipótesis de que la cobertura natural de páramo protege al suelo de la alta radiación solar de estos ecosistemas y, por lo tanto, de su erosión. Es importante señalar que este escenario puede representar al suelo de páramo luego de quemas, en periodos luego de la cosecha en zonas de cultivos o por prácticas *irregulares* de minería, por lo cual este escenario ha sido estudiado de forma general, es decir sin una causa específica de la alteración.

Con una recuperación del 100% del territorio de páramo en Quinahuaycu, se podría disminuir en 400 000 m<sup>3</sup> la escorrentía directa y aumentar en 150 000 m<sup>3</sup> el almacenamiento en el suelo, cifras equivalentes a llenar 118.5 y 44.4 piscinas olímpicas respectivamente. Esta capacidad de amortiguamiento del páramo constituye un mecanismo fundamental para evitar inundaciones en la época de lluvia en las zonas aguas abajo y para garantizar un caudal base sostenido en las épocas de sequía. En suma, la cobertura natural del páramo brinda las funciones ambientales de aplanar los picos de caudal y regular el agua a lo largo del año.

Con respecto a la modelación hidrológica, el verdadero reto es la obtención de información espacial y temporal de partida, de calidad y en una adecuada cantidad. Esta información es la principal fuente de error en los modelos y en los ecosistemas andinos la extrema variación espacio temporal de la lluvia representa la principal fuente de incertidumbre, como prueba, en la microcuenca Quinahuyacu, en el periodo de estudio 2018-2019, el coeficiente de variación de Pearson de la precipitación presenta un valor promedio de 1.5.

El correcto monitoreo de variables hidrometeorológicas constituye una parte fundamental para poder obtener una buena eficiencia del modelo y por consiguiente un buen grado de confiabilidad en los resultados de las hipótesis probadas, las cuales pueden servir como base para el manejo y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico. En consecuencia, el subproceso "Información Espaciotemporal" del diagrama de flujo de la calibración, ha requerido un amplio análisis de datos, por lo que se realizó una macro para facilitar el proceso de análisis y visualización de datos estadísticos. Por último, es importante mencionar que ya existen estudios para mejorar la calibración de un modelo partiendo de información espacio-temporal de baja calidad, como ejemplo el realizado por (Sucuzhañay & Céleri, 2018).

Para el caso puntual de la microcuenca Quinahuaycu, el modelo ha sido optimizado para estudiar el balance hídrico, minimizando los errores promedio y maximizando la

eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe. En el proceso de calibración para los escenarios RCN y AVHp se obtuvo una eficiencia promedio de 0.793 y de 0.73 para el proceso de validación. En el escenario ASD se obtuvieron eficiencias de 0.775 y 0.726 para los procesos de calibración y validación respectivamente.

En (Sucuzhañay & Céleri, 2018) se puede comprobar que cuando se usa la información de un pluviómetro ubicado en la parte baja de la cuenca, la eficiencia del modelo en la validación tiende a disminuir debido a las variaciones anuales de la precipitación y se incrementa cuando el pluviómetro usado está ubicado en la mitad de la cuenca, por este motivo, si se cuenta con un solo pluviómetro para monitoreo en una microcuenca, es recomendable ubicarlo en la mitad de la zona de estudio de interés. El pluviómetro usado en Quinahuyacu se encuentra ubicado en la parte baja, por lo tanto, la disminución de la eficiencia en la validación tiene congruencia con lo descrito en (Sucuzhañay & Céleri, 2018).

Para replicar este estudio es importante tener en cuenta que el modelo ha sido optimizado para estudiar el balance hidrológico, si se desea estudiar crecientes o estiaje de ríos, se recomienda calibrar el modelo optimizando los criterios de eficiencia relacionados con los caudales máximos o mínimos y planteando una nueva función objetivo o modificando la presentada en este estudio. Por último, la eficiencia del modelo (**Nash-Sutcliffe**) debe ser optimizada en cualquier caso de estudio.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.] Amat y León, C. (2008). *El Cambio Climático no tiene fronteras: Impacto del cambio climático en la Comunidad Andina*. Libélula.
- [2.] Andrade, L., & Ríos, C. (2014). Variabilidad Climática y Caudales Mínimos en los Andes Ecuatorianos. *Revista EPN*, 33(1).
- [3.] Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (1.<sup>a</sup> ed.). Limusa.
- [4.] Apaza, D., Arroyo, R., & Alencastre, A. (2006). *Las Amunas de Huarochirí: Recarga de Acuíferos*. GSAAC.
- [5.] Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., Cárdenas, A., & Velástegui, A. (2009). *Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador*. Ecociencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA.
- [6.] Breña, A., & Villa, M. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- [7.] Cabrera, J. (2012). *Calibración de modelos hidrológicos*. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño. Universidad Nacional de Ingeniería.
- [8.] Camacho, M. (2014). Los páramos ecuatorianos: Caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas*, 77-92.
- [9.] Campos, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (Tercera, Vol. 2). Editorial Universitaria Potosina.
- [10.] CEPAL. (2000). *Agua para el siglo XXI para América del Sur: Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en el Ecuador*. Global Water Partnership.
- [11.] Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71-83.
- [12.] Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos. CONDESAN*, 288-304.
- [13.] Devia, G., Ganasri, B., & Dwarakish, G. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.
- [14.] ETAPA EP. (2021). Plantas de potabilización. *Agua Potable de Cuenca*. <https://www.etapa.net.ec/principal/agua-potable/operacion-y-mantenimiento/plantas-de-potabilizacion>
- [15.] ETAPA, & GAD Cuenca. (2018). *Elaboración del Plan de Manejo del Área Nacional de Recreación Quimsacocha* [Ministerio del Ambiente].

- [16.] FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO: Riego y Drenaje*.
- [17.] Gutiérrez, C. (2014). *Hidrología Básica y Aplicada*. Editorial Universitaria Abya-Yala.
- [18.] Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN.
- [19.] Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (Eds.). (2003). *Los Páramos del Mundo*. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC.
- [20.] Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas* [Pregrado]. Universidad Politécnica de Valencia.
- [21.] iMHEA. (2020). *Impactos del uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas*.
- [22.] Isch, E. (2012). *El cambio climático y la gestión de páramos*. Consorcio Camaren.
- [23.] Ivkovic, M. (2014). *Hydrological model theory HBV. DRIHM 11/17* [DRIHM Summer School].
- [24.] Llambí, L., Soto-W, A., Céleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos*. Proyecto Páramo Andino.
- [25.] Mena, P., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., Lasso, S., Medina, G., Ochoa, N., & Ortiz, D. (Eds.). (2011). *Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado*. Ecociencia/Abya Yala/Ecobona.
- [26.] Mendoza, P. (2020). [CI71F / Modelación Hidrológica] Clase I—Nociones de Modelación Hidrológica [YouTube]. <https://www.youtube.com/watch?v=DaTw-oLiFQI&t=420s>
- [27.] Montalván, I. (2017). *Evaluación del desempeño del modelo hidrológico HBV-Light en una microcuenca de páramo* [Pregrado]. Universidad de Cuenca.
- [28.] Ochoa, B. (2015a). *Elementos de Hidrología Superficial: I. Ciclo hidrológico y sus procesos*. Universidad de Cuenca.
- [29.] Ochoa, B. (2015b). *Elementos de Hidrología Superficial: III. Método FAO Penman-Monteith*. Universidad de Cuenca.
- [30.] Ochoa, B. (2015c). *Elementos de Hidrología Superficial: V. Escorrentía; Cuenca hidrográfica, propiedades y caracterización*. Universidad de Cuenca.
- [31.] Ochoa, B. (2021). *Amunas: Soluciones ancestrales basadas en la naturaleza para la seguridad hídrica*. VIRTUAL.EXPOAGUAPERU.COM
- [32.] POMCA. (2014a). *Guía técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*.
- [33.] POMCA. (2014b). *Morfometría del la cuenca mayor del río La Vieja*.

- [34.] Ruiz, F. (2009). *Urkukuna, los Páramos*. Programa de formación en páramos. MICC-IEE.
- [35.] Seibert, J. (2005). *HBV light version2 User's Manual*. Department of Physical Geogaphy and Quaternary Geology.
- [36.] Seibert, J. (2011). *Introduction to hydrological modelling and the HBV model* [Environmental Assessment].
- [37.] Sucuzhañay, A., & Célleri, R. (2018). Impact of Rain Gauges Distribution on the Runoff Simulation of a Small Mountain Catchment in Southern Ecuador. *Water*, 10(9). <https://doi.org/10.3390>
- [38.] University of Zurich website. (2020). HBV-light Model [Ciencia y tecnolog[ia]. *Department of Geography*.
- [39.] Varas, E., & Bois, P. (1998). *Hidrología Probabilística*. Universidad Católica de Chile.
- [40.] Vásquez, P., & Guzmán, P. (2011). Cambio de Paradigma en el Pronóstico del Recurso Hidrológico-Influencia del Cambio Climático. *CONELEC*, 7(1), 26-33.
- [41.] Ven Te Chow, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- [42.] Vidmar, A. (2016). *Precipitation and Runoff modeling of Savinja catchment* [UNESCO].
- [43.] Viessman, W., Lewis, G., Knapp, J., & Harbaugh, T. (1989). *Introduction to Hydrology* (4 ta). Pearson.
- [44.] Villue M. (2013). *El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales*. Banco Interamericano de Desarrollo.

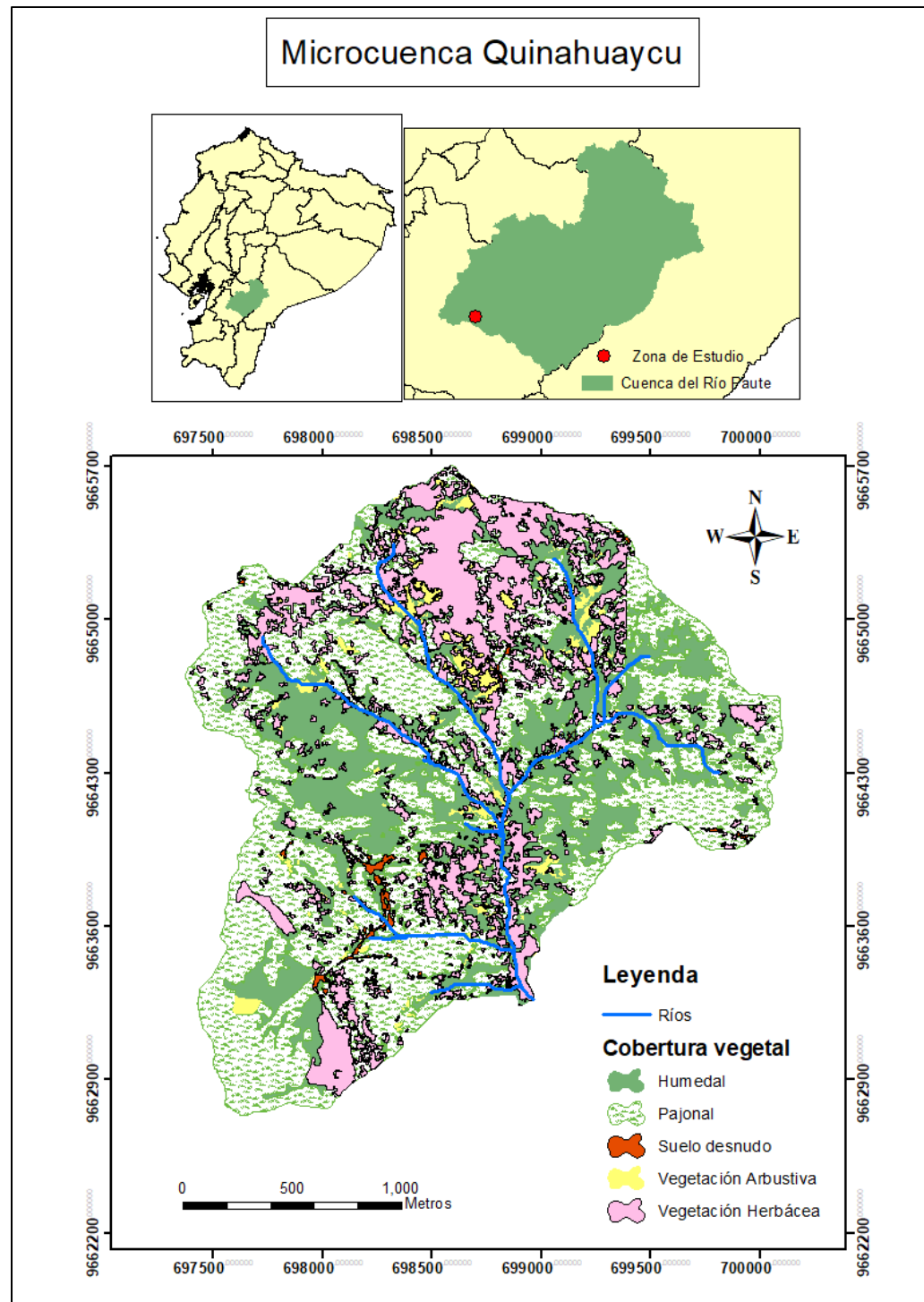
## 7. ANEXOS

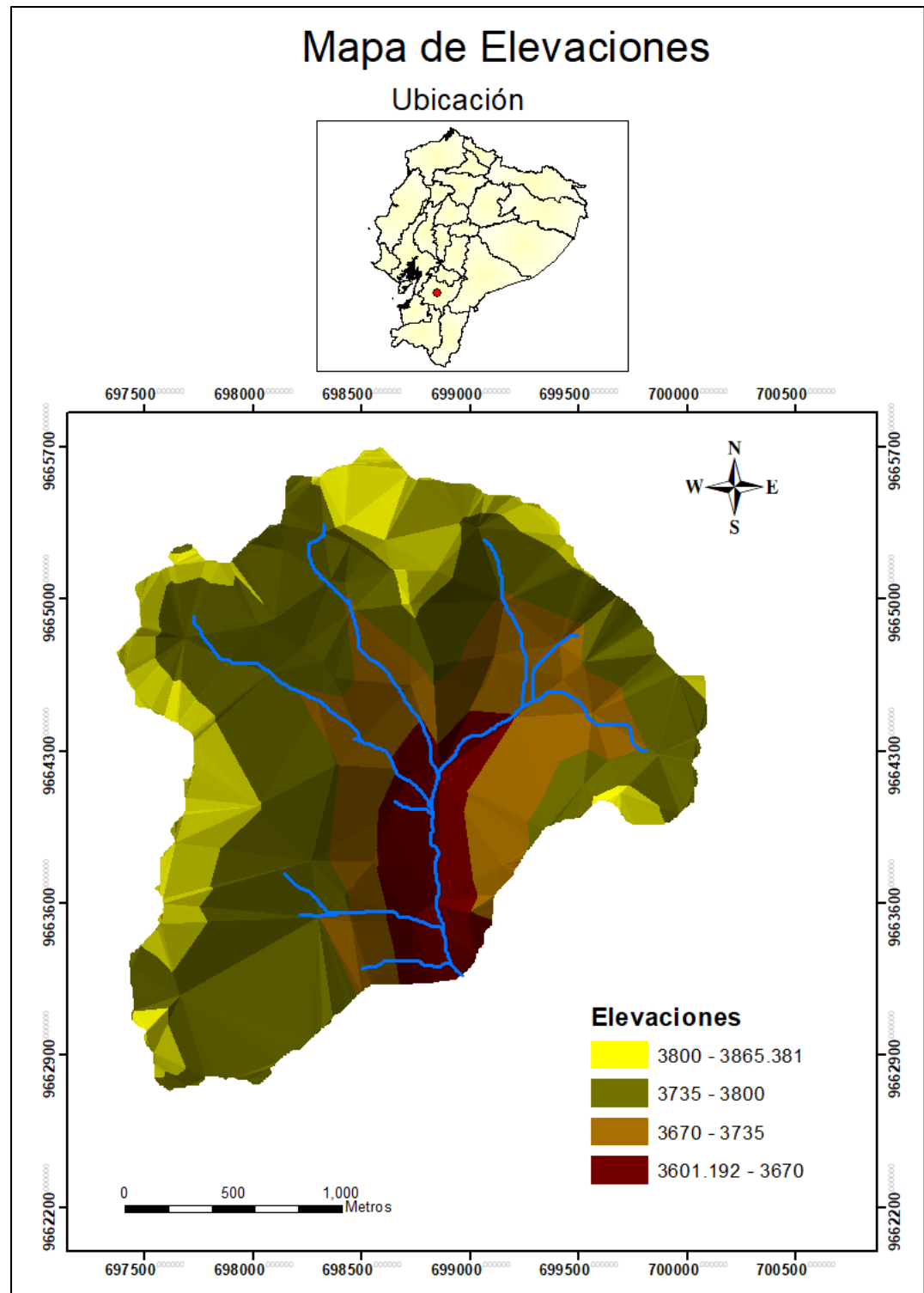
### 7.1. Mapas de Caracterización

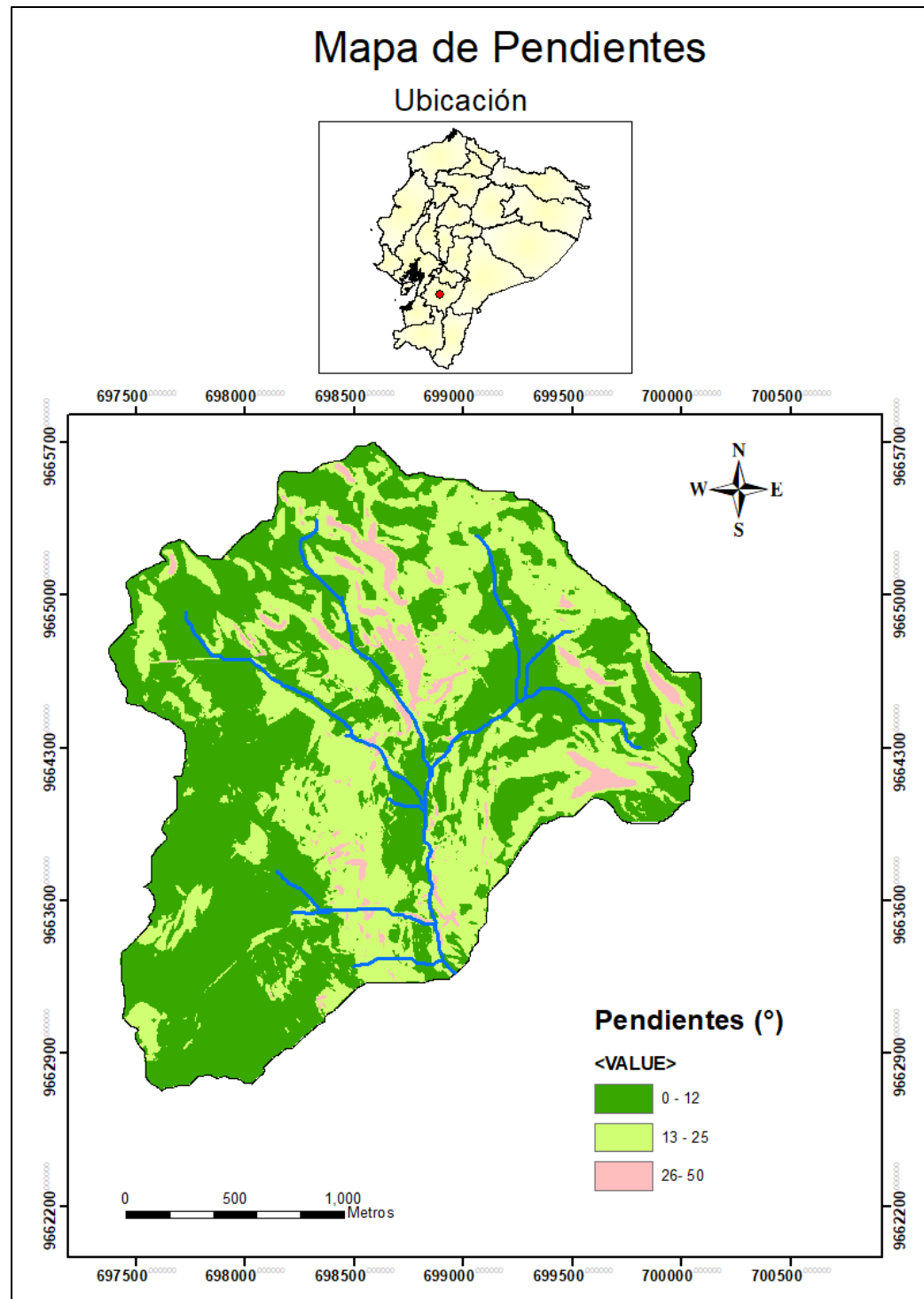
Para descargar los mapas temáticos de Quinahuaycu, se puede escanear el siguiente código QR:

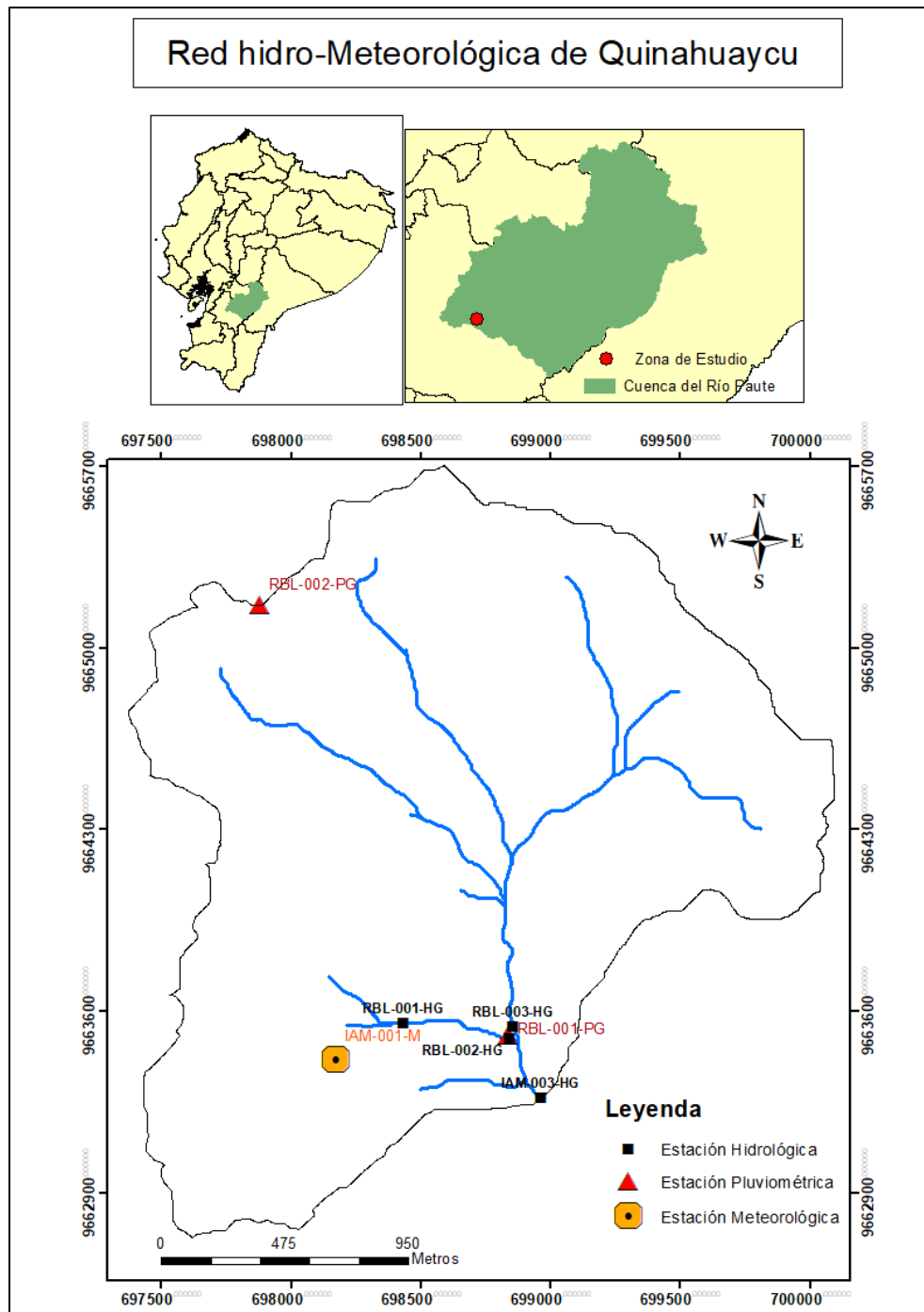






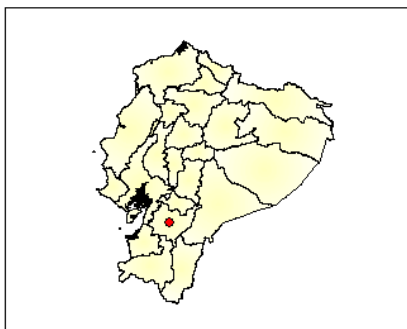




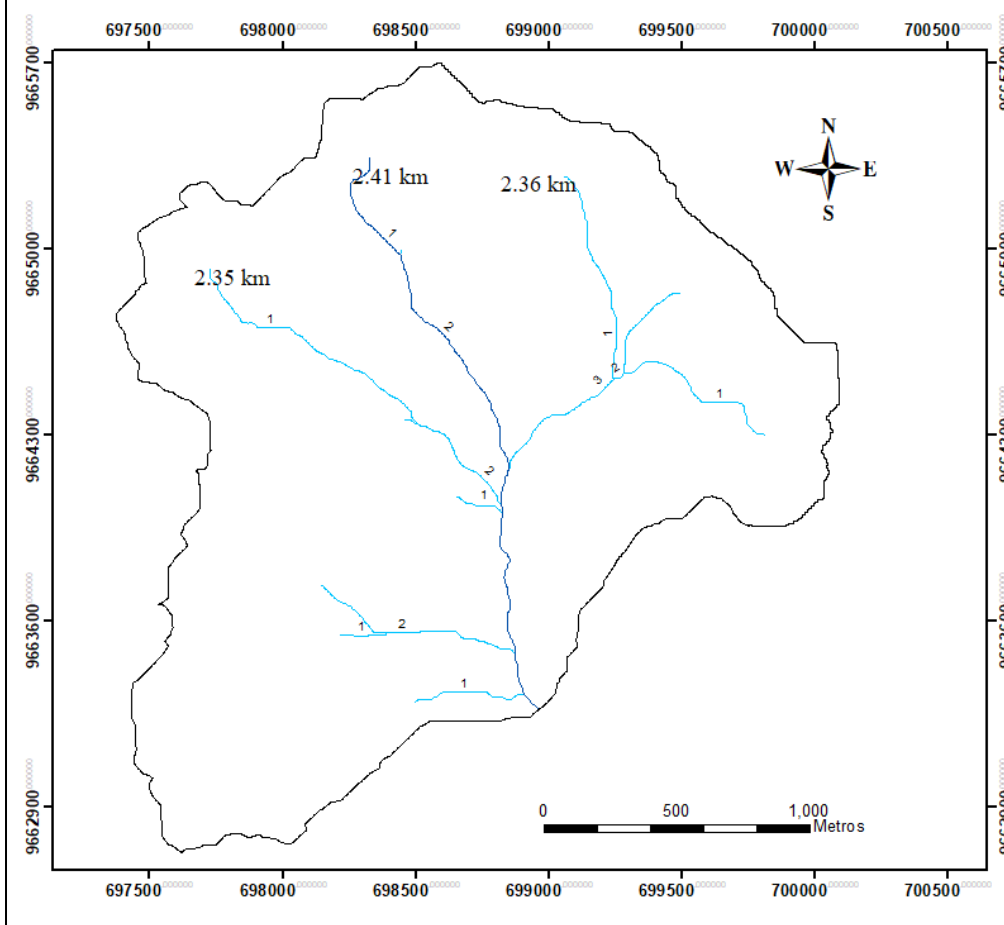


## Mapa de la Red Hídrica

### Ubicación

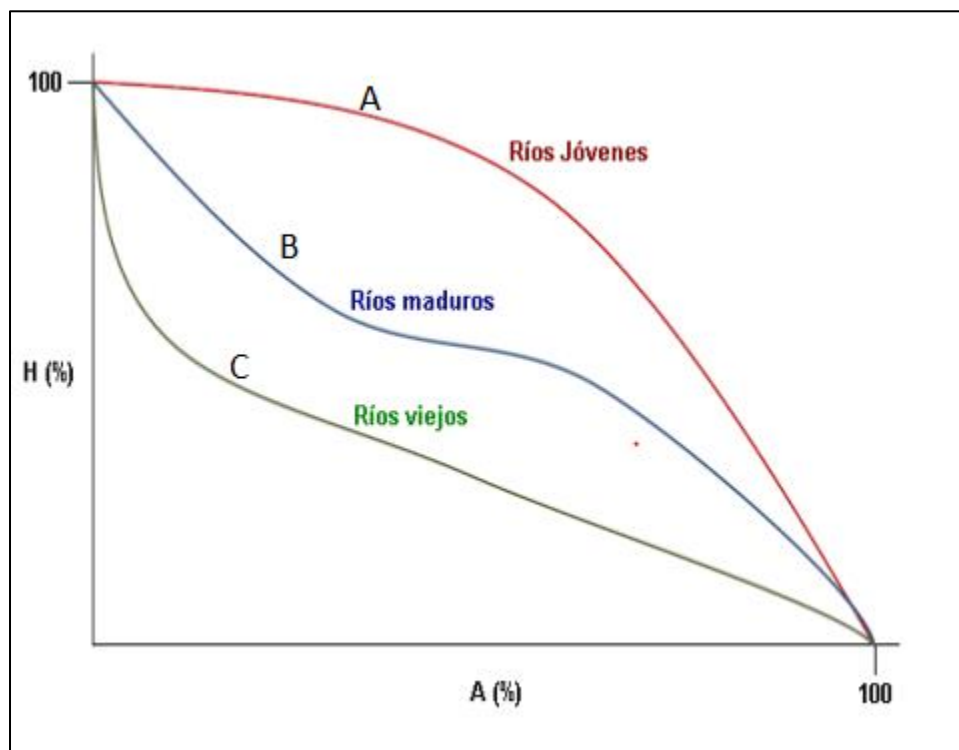


Densidad de drenaje: 1.97 km/km<sup>2</sup>  
Extensión media de la escorrentía superficial: 0.13 km  
Pendiente media: 7.5%  
Sistema fluvial no sinuoso



## 7.2. Curva Hipsométrica

### 7.2.1. Tipos de Curvas



(Ibáñez et al., 2011)

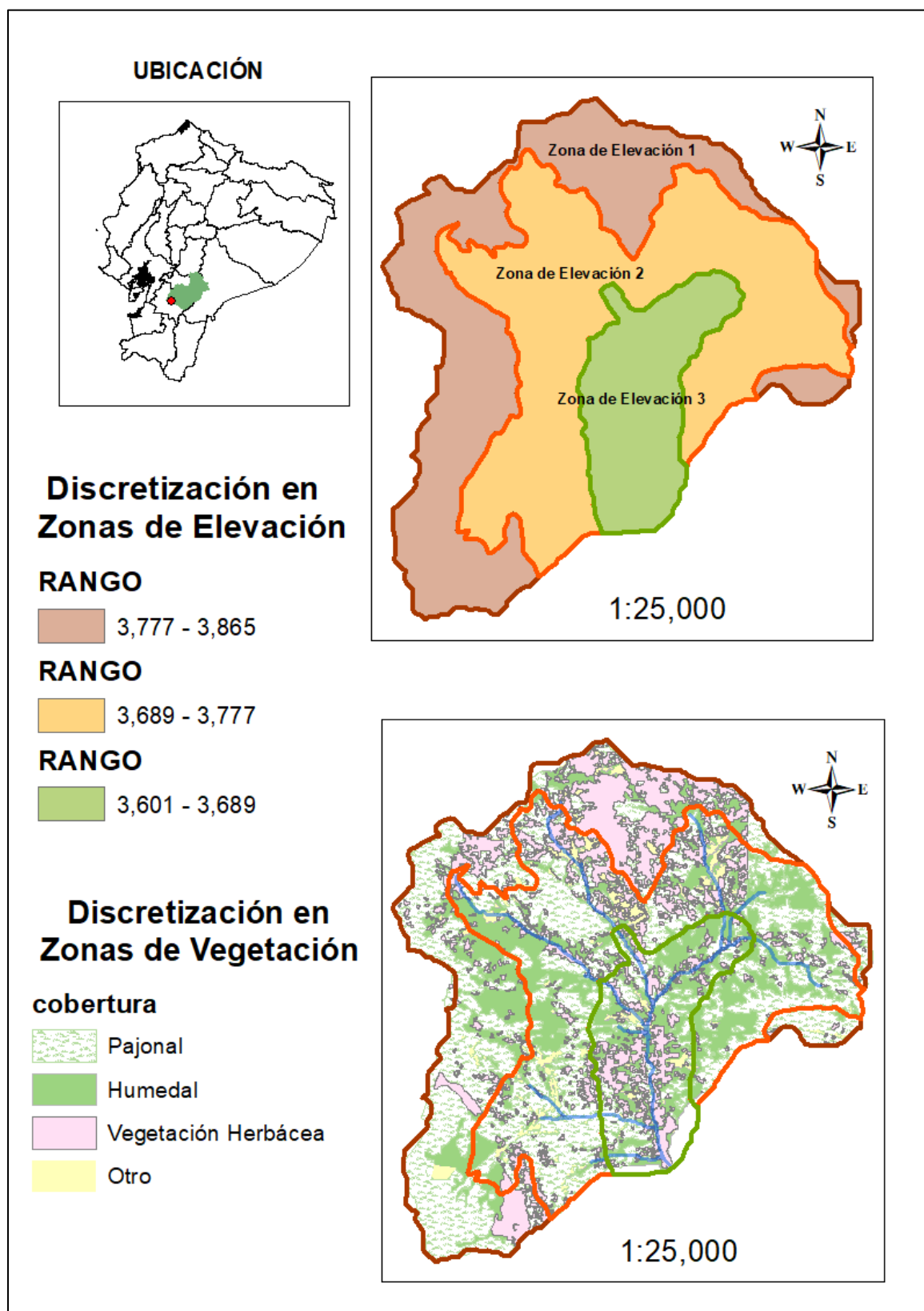
### 7.2.2. Tabla de frecuencias altimétrica de la microcuenca Quinahuaycu

Num	Intervalo			A(m <sup>2</sup> )	%A	%Aacum
	Min	Max	$\mu$			
			0		0	100
1	3601	3628	3619	76401	2	98
2	3628	3654	3642	252414	5	93
3	3654	3680	3668	321813	7	87
4	3680	3707	3694	452250	9	78
5	3707	3733	3721	515079	10	67
6	3733	3760	3747	775755	16	51
7	3760	3786	3774	1133100	23	28
8	3786	3813	3797	962802	20	9
9	3813	3839	3821	337167	7	2
10	3839	3865	3848	86193	2	0

### 7.3. Cauce principal

Num	Max	Min	$\Delta Z$	Lcp i	Lcp i+1
1	3785	3755	30	0	200
2	3755	3730	25	200	400
3	3730	3720	10	400	600
4	3720	3710	10	600	800
5	3710	3670	40	800	1000
6	3670	3660	10	1000	1200
7	3660	3640	20	1400	1600
8	3640	3630	10	1600	1800
9	3630	3620	10	1800	2000
10	3620	3610	10	2000	2200
11	3610	3605	5	2200	2400

#### 7.4. Discretización de Quinahuaycu para el caso de estudio





## 7.5. Resultados gráficos (HBV-light) caja de suelo, R1 y R2 de la Validación

- Caja Suelo

El primer gráfico representa la cantidad de agua total almacenada en el suelo, esta corresponde a la humedad del suelo y la intercepción de la vegetación. El segundo gráfico muestra la ETc (rojo) y la ETo, se puede comprobar que la vegetación de estos ecosistemas requieren menos agua que la que la vegetación de referencia (FAO Penman-Monteih).



- R1 y R2

Los flujos para el reservorio lineal superior (R1), se muestran en el primer gráfico, y para el segundo gráfico se muestra el caudal base. Se puede observar que el flujo base mantiene una cantidad constante a lo largo del año.

